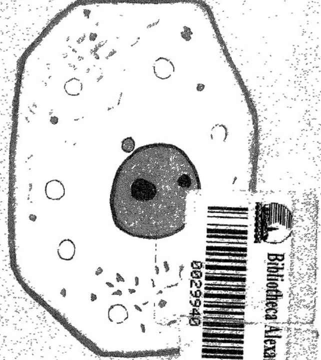
الجزء الأول

كيمبل
بيولوجي





تعريب
أ.د/ شاكر محمد حماد
أ.د/ عادل إبراهيم الجزار

مراجعة
أ.د/ عبد الحليم منتصر





كيمبل
بيولوجي

الجزء الأول

كيمبل

بيولوجي

John W. Kimball **الجزء الأول**

تأليف

جـون و. كيمبال

تعريب

أ. د/ شاكر محمد حماد
أستاذ علم الحشرات
جامعة الملك فيصل (سابقاً)

أ. د/ عادل إبراهيم الجزار
أستاذ علم النبات
جامعة الملك فيصل (سابقاً)

مراجعة

أ.د/ عبد الحليم منتصر
أستاذ علم النبات وعضو مجمع اللغة العربية



ص. ب: ١٠٧٢٠ ـ الرياض: ١١٤٤٣ ـ تلكس ٢٠٣١,٢٩ ٤٠٣١
المملكة العربية السعودية ـ تلفون ٤٦٥٨٥٢٣ ـ ٤٦٤٧٥٣١

رقم الإيداع
٩٣/٥٠١١

حقوق النشــر :-

Biology, by John W. Kimball

الطبعة العربية :-


بسم الله الرحمن الرحيم

المحتويات

الجزء الأول

القسم الثالث : حياة الخليـة

القسم الرابع : الوراثـــة

القسم الخامس : التكاثر والنشأة

القسم السادس : تنظيم البيئة الداخلية

الجزء الثاني

القسم السابع : الاحساس والتناسق

القسم الثامن : التطـــور

القسم التاسع : علم البيئة
الدراسة الاحيائية للعشائر وبيئتها

تمهيد

PREFACE

تم إعداد هذه الطبعة الخامسة من كتاب الأحياء لنفس أهداف الطبعات السابقة. وتـظل المـوضوعات مرتبة تبعا لخطوط وظيفية أي أن النواحي المختلفة لعلم الأحياء تدرس من وجهة نظر الميزات والمشاكل التي تشترك فيها كل الكائنات الحية وهذه تتراوح بين التنظيم الجزيئي والخلوى إلى الوارثة وطرق التكاثر والأيض والاحساس والتطور ، وانى لآمل من وراء هذا الترتيب أن ينقل إلى القارىء فكرة أفضل عن توحد الصور المتباينة للحياة، وبالاضافه إلى ذلك فقد أعيد تنظيم بعض الأبواب حتى تكون أكثر توافق مع الخط التنظيمي العام وعلى ذلك فقد إنضمت كل المعلومات عن حياة الخلية (الجزءان الثاني والثالث) وكل الأبواب التي تتناول وظائف الأعضاء (الأجزاء الخامس والسادس والسابع) مع بعضها. وحينما بدأت إعداد هذه الطبعة الجديدة كانت أمامي عدة أهداف أحدها بالطبع هو تحديث ماده الكتاب في المجالات التي تتطور بسرعه. ولذا فإن القاريء سوف يجد باباً جديداً عن تنظيم المعلومات الوراثية (كيف تتجمع المورثات وكيف تتم «قراءتها» ـ الجينات المتراكبة والمفصولة والمنقولة وطرق تهجين الحامض النووى (DNA) . هناك قسمان جديدان عن بيولوجيا السرطان كما نقحت بتوسع علم المنـاعة (بما في ذلك تولد التباين في الاجسام المضادة) وفسيولوجي الأعصاب للمخ البشرى (بما في ذلك مناقشة البيبتيدات شبه الأوبيات) وأصل الحياة. أما الموضوعات الأخرى التي تظهر لأول مره في صوره منقحه فهي تشمل: الحامض DNA الأعسر (Z) وتضاعف الحامض DNA الشفره الوراثية الخاصة بالميتوكوندريا والاوزموزية الكيميائية - الخيوط الوسطية في الخلايا - الانتشار المساعد - التنظيم الحرارى في الفقاريات ـ التـوجـه المغنـاطيسي في البكتريا والفقاريات - والأهمية التأقلمية للسلوك - البكتريا

القـديمة - الطحالب الخضراء الأوليه - النظم البيئيه في المياه العذبة وفي البحار - الطرق المعتمدة وغير المعتمدة على الكثافة للحد من نمو العشائر - الجغرافية الحيوية للجزر - وتطور الانسان.

ولعـل أهم التغيرات التي طرأت على هذه الطبعة هي إدخال العديد من الصور الملونـه في أجزاء كثيره من الكتاب. كما أن عدداً من صور الأبيض والأسود جديده ويظهر كذلك ٦٧ رسماً وشكلاً جديداً لأول مرة. كما أعيد رسم أشكال عديدة ليس فقط لتكون وسائل إيضاح فعاله وإنما لكى تسر الناظرين أيضاً.

والتقدم السريع الذي يحدث في علوم الأحياء يجعل هناك المزيد والمزيد كل عام مما نود أن نقوله للطلاب ولكن من عيوب ذلك أن كتب علم الأحياء تزداد كثيرا في الحجم حتى أن بعضها يصل الى أحجام عملاقة. ومع كل ما كنت أرغب في إضافته فقد كان من العسير ان أحافظ على حجم معقول لهذه الطبعة ومع ذلك فقد إختصرت او الغيت بعض الموضوعات تماماً لإفساح المجال لموضوعات أخرى. علما بأنني تلقيت رجاء واحد على الأقل ممن راجعوا الكتاب لإعاده كل واحد من الموضوعات التي حذفت. لذا فأنني آمل الا يكون أحد موضوعاتكم المفضلة قد إختفى فاذا كان ذلك قد حدث فانكم ربما توافقوننى على أن الموضوعات التي حلت محله لها درجة أعلى من الأولويه.

تميل كتب علم الأحياء المبـدئية إلى أن تكـون مجرد تجميع لبعض الإستنتـاجات وبـالنسبـة لكثير من الطلاب فإن ذلك يعد وضعاً مناسباً: فهم يفضلون أن يعرفوا الإجابات دون أن يشغلوا أنفسهم بالوسائل التي أدت إلى التوصل إليها وبها يكتنفها من الريبة. كما أنها أيضا الطريقة الوحيدة لكى يكون حجم الكتاب الذي يغطى كل مجالات هذا العلم معقولا. ولكن ذلك ليس علماً جيداً، فالمساعي العلمية لها بعض خصائص القصص البوليسية من حيث جمع الأدلة وسبر أغوار الاحتمالات المختلفة. ولقد حاولت في كل هذه الطبعة أن أركز على المشاهدات والتجارب التي تشكل الأساس بالنسبـة لمفهـومنا لعلم الأحياء أو أقدم إفتراضات بديلة إذا كانت الأدلة ضعيفة أو متناقضة. لقد كتبت باباً خاصاً في هذه الطبعة عن الطرق العلمية. وقد حاولت أن أبين كيف يصمم العلماء التجارب بإستخدام مثال من دراسة مشكلة حيوية معينة (في الحساسية) وكيف يتم تقييم التجارب وتوصيل النتائج للآخرين.

إننى مدين للكثيرين على ما قدموا من مساعدات اثناء إعداد هذه الطبعة: لكل العلماء الذين أمدوني بالصور وصور المجهر الاليكتروني والذين تظهر أسماؤهم قرين الأشكـال المستمـدة من عملهم. وكذلك لتلامذتى في قسم الأحياء بجامعة تفتس والذين كانوا بمثابة حيوانات تجارب إختبرت فيها الموضوعات الجديدة. وسارا بينيت (مـركـز الأبحاث الحقلية - بلمونت - ولايه ماساشوستس)، مايكل كولنز (جامعة ميموريال في نيوفوندلاند) - دوريس هيلمز (جامعة كليمزون) - توماس ل. كوبنهيفر (جامعة ترينيتى) - جون س. نيس (جامعة ويسكونسن - ماديسون) - وجوزيف م. وود (جامعه ميسورى - كولومبيا) وكل منهم قد راجع جزءاً كبيراً من الكتاب و أبدى العديد من الاقتراحات القيمة. وأنا مدين كذلك لروبرت دانو الذي لم يقم فقط برسم العديد من الرسوم والأشكال الجديدة بل أعاد أيضا رسم الكثير من الأشكال المأخوذه من الـطبعـات السابقة وكذلك أشكر كل العاملين في أديسون - ويزلي لمجهوداتهم الشاقة في كل مراحل إعداد الكتاب.

أملي كبير في أن تلبى هذه الطبعة احتياجات من يختارها من المدرسين وأن ترقى إلى مستوى توقعاتهم وكذلك (وخاصة) بالنسبه للطلاب الذين يقرؤنها. وأرجو ان أتلقى أى تصويبات أو مقترحات يمكن ان تسهم في تحسينها.

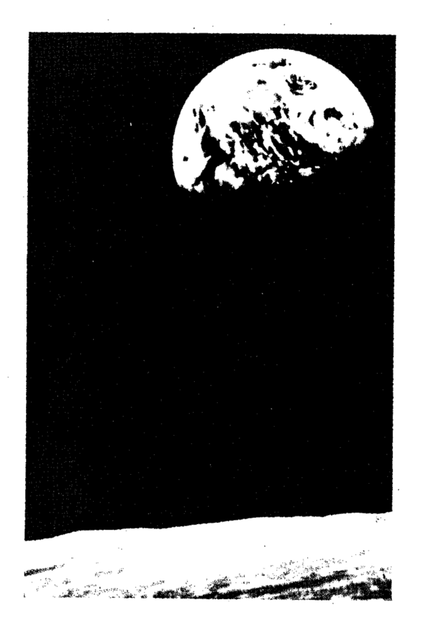
أندوفر - ماساشوستس ج. و. ك.

ديسمبر ١٩٨٦



PART 1 القسم الأول

INTRODUCTION مقدمة



كوكبنا كما رآه من القمر طاقم المركبة أبوللو ٨ (بتصريح من ناسا)



CHAPTER 1 — الباب الأول

WHAT IS LIFE — ماهي الحياة ؟



الباب الأول

ماهي الحيـــاة ؟

١-١ . لماذا ندرس علوم الحياة؟ WHY STUDY BIOLOGY ?

هناك سبب يفوق كل الأسباب: حتى نعرف المزيد عن إنفسنا وعن العالم الذي نعيش فيه. نحن حيوانـات وفي كثير من النواحى لانختلف عن بقية الحيوانات إلا قليلا. وفي قليل من النواحى نختلف بدرجة كبيرة تجعلنا نحتل موقعا فريدا في هذا العـالم. وعلى الـرغم من أنه لايمكن القطع بأن لنا ميزات خاصة لاتتوفر بأي قدر للحيوانات الأخرى إلا أنه من الواضح تماما أننا نتمتع بقدر أكبر بكثير من هذه المزايا. ومن هذه المزايا حب الإستطلاع. ويمكن تعريف البشر بأنه «الانسان الذي يعلم». والرغبة في المعرفة هي العلامة المميزة للوجود البشرى. وعلى ذلك فإننا ندرس علوم الحياة لنفس الأسبـاب التي من أجلها ندرس الفيزياء والرياضيات والتاريخ والأدب والفن: لاكتساب المعرفة حول المزيد من مظاهر حياتنا وعالمنا.

كما يجب أن نلاحظ كذلك أنه يمكن أن نبنى حياة عملية نافعة على الالمام بعلوم الحياة. فمعامل الجامعات في حاجة إلى من يضطلع بمهمة الاكتشافات الجديدة التي تجعل هذا الكتاب قليل الفائدة سريعا. كما أن هناك حاجة إلى من يطبق معرفته بعلوم الحياة في مثل تلك المجالات العلمية كالطب والبحوث الزراعية. والحاجة مستمرة دائما إلى مدرسى علوم الحياة لنقـل معـارفهم التي إكتسبـوها ممن سبقهم من الأجيال إلى الأجيال القادمة.

وسوف يكون كل مواطن قادرا على الادلاء بصوته بذكاء فيما يتعلق بمسائل مرتبطة بمبـادىء علوم الحياة وبـرفـاهية الانســان. مسائل مثل العقاقير والمبيدات الحشرية والاشعـاع ووسـائل الهندسة الوراثية ومعايير تحديد النسل وهي ليست إلا قليل من

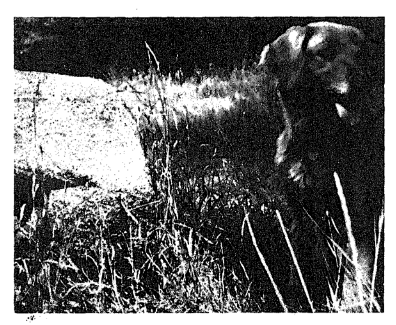
المسائل العديدة التى يمكن للمعرفة بعلوم الحياة أن تغير من حياتنا فيها . والذي يمكن أن يقرر ما اذا كانت هذه المعرفة تزيد من قيمه الحياة أو تسلب كل قيمه لها هو إستيعاب المواطنين لعلوم الحياه . ولكى نتخذ قرارات فعاله في هذا الصدد لابدلنا ليس فقط أن نفهم القيم التي تجب حمايتها والعمل على انتشارها ولكن يلزم لنا أيضا معرفه بالأسس الفيزيائية و الحيوية التي تقـوم عليها حياتنا . وفهمنا للأولى لابد أن يأتي من دراسة للتاريخ والدين والفلسفة والأدب والفن – أى للدراسات الانسانية . أما معرفتنا بالثانية فلابد أن تأتي من دراستنا للعلوم . وهذا الكتاب هو محاولة للمساعدة في دراسة أحد هذه العلوم : وهو علم الأحياء .

١-٢ . خصائص الحياة THE CHARACTERISTICS OF LIFE

عادة يكون تمييز الحياة أسهل من تعريفها . فكلنا يستطيع أن يدرك أن الكلب حي بينما الحجر ميت (الشكل ١-١) . ماهي إذن الخواص التي تميز الكلب عن الحجر ؟

في عام ١٩٧٦ وفي العشرين من يوليو وفي تمام السـاعة الحادية عشرة والدقيقة الثالثة والخمسين بتوقيت جرينتش ثم في الثالث من سبتمبر وفي تمام الساعة العاشرة والدقيقة التاسعة والثلاثين بتوقيت جرينتش هبطت مركبتان فضائيتان هما فايكنج – ١ و فايكنج – ٢ على سطح كوكب المريخ . وكان في كل مركبة عدد من التجارب المصممة لاكتساب المزيد من المعلومات عن الكوكب ومن بين هذه التجارب كانت هناك خمس لمحاوله الإجابة على السؤال : هل هناك أى حياة على المريخ ؟

وكـانت أكثر هذه التجارب قربا من الاجابة المباشرة هي كاميرا تلفيزيونيه . فلو أن عدسة الكاميرا شاهدت أحد المخلوقات على المريخ لحصلنا على اجابة على هذا السؤال . ولكن ذلك لم يحدث . كما لم يحدث أن نقلت الكاميرات أى علامات تدل على نشاط كائنات حية . كانت هناك وفرة من الاحجار ولكن لاشيء يشبه الكلب . اذن ماهي الانواع الاخرى من دلائل الحياة يمكن ان نبحث عنها ؟

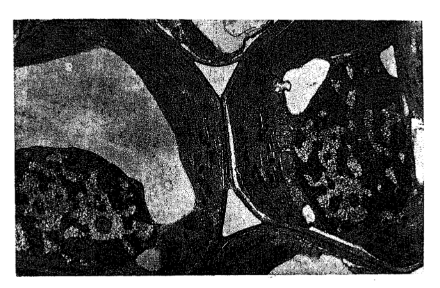


الشكل ١-١

١- التنظيم المعقد للحياة THE COMPLEX ORGANIZATION OF LIFE

قد تبـدو بعض الأحجـار معقدة بشكل ما وفيها المعادن المختلفة مبعثرة. ولكن تنظيمها هذا هو البساطة بعينها اذا ما قورن بالتعقيد الموجود في أى كائن حى. فاذا فحصنا أى جزء من جسم كلب مجهريا فاننا سوف نكتشف أنه مكون من خلايا cells. هذه الـوحـدات - وهي عادة أصغر من أن تراها العين المجردة - تكون منتظمه في أنسجـه tissues وهـذه بدورهـا تشـكـل أعضـاء organs مثـل المعـدة والكلية. ومجموعـة من الأعضاء مثل المعدة والكبد و الأمعاء تعمل معاً كجهاز system .

وعلى مدى عدة قرون درس علماء الحياة هذه المستويات لتنظيم الحياة. وفي هذا القرن تم استحداث طرائق ومعدات حديثة ساعدت علماء الحياة على المزيد من التعمق في تعقيدات الكائنات الحية. فالمجهر الالكتروني على سبيل المثال قد كشف درجه من التركيب والتنظيم التحت خلوى والتى لم تكن لتخطر على بال أحد منذ أربعين عاما خلت (الشكل ١-٢). كما أنه أصبح الان ممكنا التعمق أكثر فأكثر وتشريح التراكيب التحت خلوية المسماة بالعضيّات الى جزيئاتها الكبيرة وجزيئاتها الصغيرة بل والذرات التي تتركب منها بواسطة الطرائق والاجهزة الكيميائية.



الشكل ١-٢. خلايا ورقة عباد الشمس كما ترى بالمجهر الاليكتروني وتبدو أجزاء من ٤ خلايـا متجـاوره. لاحظ أن بداخل كل خلية عدداً من المكونات المحددة (العضيات) وهذه بدورها على قدر كبير من التعقيد في التركيب. والتركيب الذى لايمكن مشاهدته إلا بالمجهر الاليكترونى يعرف بالتركيب الدقيق (بتصريح من هـ ج أرنوت و ك. م. سميث).

ومن أهـم الخصائص المميزة للكائنات الحية على الأرض أنها تتركب من جزيئات تحتـوى على ذرات الكـربون. وهذه الخاصية مميزة للكائنات الحية لدرجة أن كيمياء مركبات الكربون تسمى بالكيمياء العضوية. وقد تحتوى الصخور أيضا على ذرات الكـربـون ولكن مالم تضعهـا فيهـا بعض مظاهـر الحياة فانها لاتحتوي على جزئيات عضـوية. وحيث أن الحياة كما نعـرفها لا توجد بدون جزيئات عضوية فان إحدى التجارب الموجودة على سفن الفايكنج الفضائية كانت مصممة للبحث عن جزيئات عضوية في عينة من تربة المريخ. ولكنها لم تجدها.

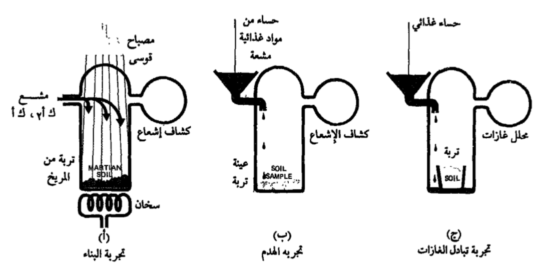
وتنظيم الذرات والجزيئات في الكائن الحى أكثر ديناميكية بكثير عنه في الكائنات غير الحية مثـل الصخور. فالصخور التى تراها الآن تحتوى على نفس الذرات التى كانت تحتوى عليها في العام الماضى. وعلى النقيض فان الكلب الذى نراه اليوم يتركب أغلبـه من ذرات اكتبسهـا منذ رأيناه في العام الماضى وهذا التبدل السريع للمادة في الكائنات الحيه هو جزء من الأيض فيها.

٢ - الأيض METABOLISM

يتبـادل الكلب المادة مع مايحيط به من الاشياء بصفة مستمرة. فنحن نراه يأكل ويشرب كما أنه يتبرز ويتبول ويتنفس. وباستخدام الاجهزه المناسبه يمكن أن نوضح أن هواء الـزفـير من الكلب يختلف في تركيبه عن الهواء الذي يستنشقه فقد اختفى الأوكسجين وحل محله ثاني اكسيد الكربون.

وتشارك جميع الكائنات الكلب في هذه الخاصية فسواء تم ذلك بسرعة أو ببطء فانهم جميعا يأخذون المادة من البيئه ويعيدونها إليها. كما أن المادة المأخوذة ليست هي تماماً المادة المعطاة فقد رأينا أن هواء الزفير يختلف عن هواء الشهيق وكثير من المواد الموجودة في البول والبراز لم تكن موجودة في الطعام المأكول. فخلال الفترة القصيرة نسبيا التى تمضيها المواد الغذائية داخل جسم الكلب فانها تمر بعدة تحولات. وفي أثناء ذلك تنطلق الطاقة وفي النهاية تظهر هذه الطاقة في صورة حرارة لتدفىء جسم الكلب. ولكن قبل أن يحدث ذلك فان الطاقة قد تستغل في بعض النشاطات الاخرى المميزة للحياه. وقد صممت ثلاث من التجارب على السفن الفضائية فايكنج للبحث عن أدلة على حدوث الأيض في عينات من تربة المريخ.

كانت واحدة من هذه التجارب تبحث عن شىء في التربة يمكنه أن يخلِّق جزيئات عضـوية معقـدة من مركبـات كربـونيه بسيطة مثل ثاني أكسيد الكربون (ك أ$_{٢}$) وأول أكسيد الكربون (ك أ). في هذه التجربة تم ادخال خليط من ك أ المشع مع ك أ$_{٢}$ (بنسبه ٩٥ : ٥) الى وعـاء يحتـوى على عينـة صغيرة من تربة ومناخ المريخ. ولما كان تخليق جزيئات عضوية من جزيئات بسيطة مثل ك أ$_{٢}$ يحتاج الى طاقة وأن الصورة الأساسية لهذه الطاقه على الأرض هى ضوء الشمس (الذي يدخل في عملية البناء الضوئى) فقد أضيء المخلوط بواسـطة مصبـاح قوسى. وبعـد ٥ أيام تم تسخين التربة لطرد أى جزيئات عضوية مشعة تكون قد تكونت من ك أ$_{٢}$ المشع (و/أو ك أ) بواسطة مخلوقات في التربة (الشكل ١ـ٣أ). هذه التجربة كانت تبحث اذن عن دليل على حدوث أيض يتم فيه تخليق مواد معقدة من مواد بسيطة. وهذا النوع من الأيض يسمى البناء anabolism.



الشكـل ١-٣. التجـارب الثلاث للكشف عن وجود الحياة والتى أجريت على مركبات الفضاء فايكنج. تجربة البناء (أ) تبحث عن دليل على حدوث البناء الضوئى. بعد انقضاء فترة الإضاءة فإن أى غازات (ك أ٢ و ك أ) غير متفاعلة تذهب أولا إلى كشاف الإشعاع وبعد ذلك فإن أى جزيئات عضوية تكون قد دخلت فى تركيب الاشعاع. هذه التجربه تعرف أيضاً بتجربة الإنطلاق الحرارى (PR).

تجربة الهدم (ب) صُممت للكشف عن إنطلاق الغازات المشعة (مثل ثانى أكسيد الكربون) من حساء المواد الغذائية المشعة الذى تبلَّل به التربة. هذه التجربة تعرف أيضا باسم الإنطلاق المشع (LR).

فى (ج) أو تجربة تبادل الغازات GFX يستعمل محلِّل الغازات للكشف عن أى تغيرات فى تركيب الغازات وبالتالى عن دليل على حدوث تنفس أى كائنات حية تكون موجودة فى التربة.

تجربه ثانيـه كانت مصممـة للبحـث عن شواهـد تـدل على حدوث الهدم catabolism أى الأيض الهدَّام. وفى هذه التجربة وضعت عينة التربة مع حساء مخفف من جزيئات عضوية مشعة فى حضانة (الشكل ١-٣ ب). وفى خلال الأيام العشرة التالية كان يتم فحص الجو فوق العينة بانتظام لتبين ظهور غازات مشعة مثل ثانى أوكسيد الكربون. فظهور هذه الغازات المشعة دليل على تحلل الجزيئات العضوية المشعة التى كانت التربة مشبعة بها.

أما التجربة الثالثة التى كانت مصممة للبحث عن دليل على حدوث الأيض في تربة المريخ فهى تبادل الغازات (الشكل ١-٣ ج). فى هذه التجربة تم وضع خليط معلوم

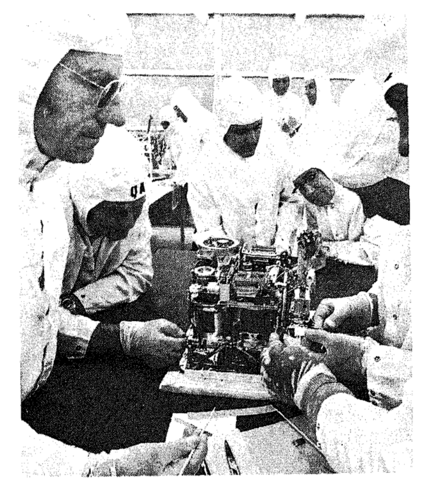
من الغازات فوق عينة من التربة وكان يتم تحليله بصفة دورية لتحديد ما اذا كانت أى غازات (مثل ك أ٢) قد اختفت منه أو أضيفت اليه .

فاذا فشلت التربة وحدها في إحداث تغيير في تركيب الغازات فانه يمكن إضافه حساء مغذى إلى التربة فاذا كانت هناك كائنات فى التربة فانها سوف تهدم الجزيئات العضوية الموجودة فى هذا الحساء وبعض نواتج الهدم تكون على هيئة غازات يمكن للاجهزة أن تكتشفها .

وكان الافتراض الاساسي في كل هذه التجارب الثلاث - والتي تمت في جهاز يزن ٣٥ رطل (١٦ كجم) مبين فى الشكل ١-٤- أن الأيض هو من أهم مميزات الحياة فاذا كانت هناك حياة فى المريخ حتى ولو فى أبسط صورة و أكثرها بدائية فانها سوف تفصح عن نفسها بقدرتها على أداء وظيفة الأيض .

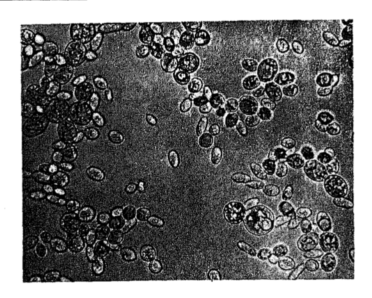
٣ - التكاثر REPRODUCTION

الفكرة فى تكاثر كائن حي هي التضاعف المنظم ذاتيا للتراكيب المميزة له . والتكاثر يحدث عندما يأخذ الكائن مادة من بيئة أكثر مما يعطى ثم يرتب هذه المادة فى شكل تراكيبه الخاصة . ونحن نسمى هذا النوع من التكاثر بالنمو growth . ولكى يفعل الكـائن ذلك فان عليه أن يبذل بعض الطاقة المنطلقه أثناء الأيض وكذلك لابد أن يحتوى على المعلومات - المطبوعة فى الجينات - التى توجه بناء هذه التراكيب . فاذا كنت قد درست الكيمياء فانه يمكنك أن تجادل بأن البللورات فى الصخر قد نمت على الأقل مرة واحدة بنفس هذه الطريقة . فاذا وضعت بللورة فى محلول من نفس وحداتها فانها تقـوم بترتيب هذه الوحدات ببطء على نفس نمطها وبذلك فهى تنمو. ولكن هناك اختلافا جوهريا بين نمو البللوره ونمو الكائن الحى . فالبللوره تنمو بتراكم وحدات مماثلة لما فيها تماما من الوسط المحيط بها أما الكائن الحى فانه ينمو بتحويل المواد التي لا تشبه مكوناته إلي مكوناته . فالكلب يمكن أن يعيش على نفس المواد التى نتغذى بها . ولكنـه يحول هذا الغذاء الى مزيد من «الكلب» بينما نحن نحولها الى مزيد من «الانســان» . وفى كل حالـة فان النمط المميز الذى تتجمع فيه المواد الغذائية يكون محكوما بالمعلومات المطبوعة في الجينات genes .



الشكــل ١-٤. العبـوة الأحيائية لسفن الفضاء فايكنج. كل المعدات اللازمة لإجراء التجارب الثلاث للكشف عن وجود الحياة معبأة في حيز يقل عن قدم مكعب واحد (بتصريح من ت. ر. و. المحدودة).

والتكاثر يشتمل أيضا على إنتاج نسخ من الكائن يمكنها أن تعيش مستقله عنه من وقت لآخر. فجميع الكائنات الحية لابد أن تموت في يوم ما وإذا كان لنوع الكائن الحى أن يستمر فانه لابد له أن ينتج نسخ من نفسه قبل أن يموت (الشكل ١-٥). وفي النباتات والحيوانات الأقل تعقيداً فإن هذا المظهر للتكاثر يمكن إعتباره ببساطه إمتداد لعلمية النمو. فنبات الفراوله النامى يرسل سوقاً أفقية تنشأ عليها نباتات بنوية. وهذا النوع مـن التكاثـر يسمـى بالتكاثر اللاجنسـي asexual لأنه لايشتمل إلا على أب واحد فقط وبصفة عامة تكون هذه النباتات البنوية مماثلة تماما للنبات الأب.



الشكل ١-٥. خلايا الخميرة تنمو فى مزرعة. تتكاثر الخلايا لاجنسيا بتكوين براعم (فتنتج شكل 8). وتنفصل البراعم بسرعة عن الخلايا الأبوية لتبدأ حياة مستقلة.

وأغلـب الكائنات تقـوم بعملية التكاثر الجنسي sexual وهو يتطلب أن يسهم أبوان في تكوين الكائن الجديد. فكل أب يعطى بعضاً من جيناته. ولكن أى هذه الجينات. ذلك متروك للصدفه. وانجاب أفراد جدد من تجمع الجينات بالصدفه من آباء مختلفة يسمح بإنتاج تجمعات جديدة من الصفات. وفي الحقيقة فإن نشأة التباين بين ذرية الأب الـواحـد لهو أهم ما يحققه التكاثر الجنسى. ومن البديهى أن ينطوي التكاثر الجنسي على تعقيدات أكثر مما ينطوى عليه التكاثر اللاجنسى. فلابد للأبوين ان يجدا بعضهـا البعض ولابد لهما أن يكونا مؤهلين للعناية بالنسل حتى يستطيع النسل أن يعتنى بنفسه.

٤- الإستجابة RESPONSIVENESS

تستطيع جميع الكائنات الحية أن تستجيب لبعض التغيرات (المؤثرات) في الوسط المحيط بها (الشكـل ١-٦). فالتغـيرات في الإضـاءة والحـرارة والجـاذبية والصـوت والكيماويات في الوسط المحيط هى مؤثرات شائعة تستجيب لها الكائنات الحية. ولكى يستجيب الكائن الحى لهذه المؤثرات لابد له من وسائل للكشف عنها. فالعيون والآذان



الشكـل ١-٦. الشمبـانـزي المراهق بيللى ينظف أسنان بانديت بآلة من فرع شجرة صنوبر بينما شادو (واقفا) يراقب. (بتصريح من س. أ. ج. نيوتين، و. س. مجرو).

والأنف في الكلب هى كواشف فعـالـة لهذه المؤثرات. وحتى تكون الإستجابة لهذه المؤثرات فعالة لابد لها من التناسق. وحتى أبسط الكائنات تتكون من أجزاء وعلى كل جزء أن يؤدي العمل المناسب فى الوقت المناسب. فحين ندعو الكلب لتناول العشاء فإن بعض عضلاته لابد لها أن تنقبض بينما لابد للبعض الآخر أن ينبسط كما تبدأ غدده الهضمية فى أداء مهامها وهكذا، وعلى كل جزء أن يعمل فى توافق مع بقية الأجزاء.

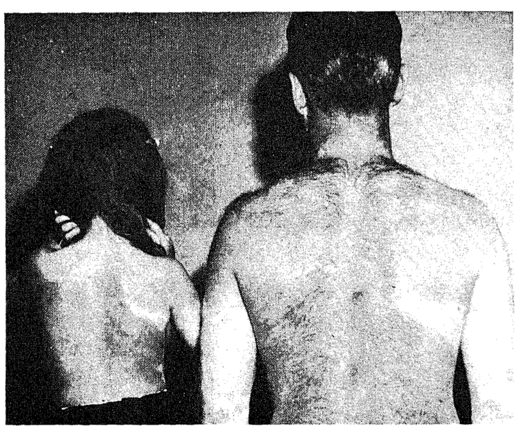
والجهـاز العصبي وجهاز من المنظمات الكيميائية يسمى بالهورمونات hormones يوجد ان هذا التناسق فيما يأتيه الكلب وحيوانات أخرى كثيرة من أفعال. أما النباتات فإنها تعتمد بالكامل في تناسقها على الهورمونات.

وتستجيب الكائنات للتغيرات في البيئة عن طريق تغيير علاقتها بها. ففي سعيه نحو الطبق الذي يحتوى على وجبه العشاء يغير الكلب مكانه إستجابة إلى إشاره منك. وهذه الإستجـابات التى غالباً ما تحدث في أنماط محددة تشكِّل في مجملها سلوك الكائن. والسلوك إيجابى وليس سلبي. فالصخرة التي تتهاوي في منحدر لاسلوك لها وإنما هي واقعه ببساطة وسلبية تحت تأثير الجاذبية. بينما الكلب الجائع يعمل على تغيير علاقته بالوسط المحيط به.

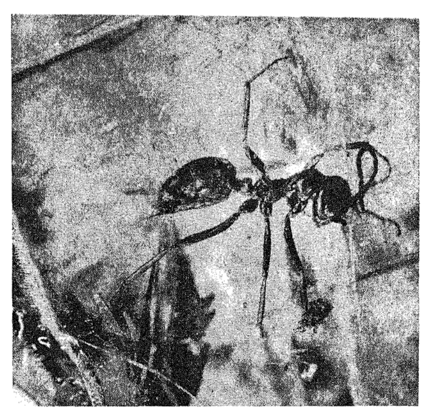
٥- التطور EVOLUTION

حينما تتكاثر الكائنات فإنها تكرر أنماطها بدقه عجيبة. فكلبان من نوع الجولدن ريتريفر ينجبان المزيد من كلاب الجولدن ريتريفر وليس لابدرادور ريتريفر. والصفات المميزة يتكرر ظهورها جيلاً بعد جيل فى عائلة ما بسبب المعلومات (الشفرة) الموجودة على الجينات (المورثات) والتى تنتقل من جيل إلى جيل (الشكل ١-٧). ولكن بعد عدة أجيال قد تظهر أيضا صفات مميزه أخرى لتستقر.

وهذه التغيرات تؤدى إلى التطور التدريجي فى هذا النوع من الكائنات. وفى الشكل ١-٨ توجد نمله (سفيكوميرما فرياى) سقطت فى فخ وتحولت إلى الحاله الحفريه منذ مائه مليون عام. وليس هناك أدنى شك فى أن هذا المخلوق هو نمله ولكنها تختلف فى صفات عديدة عن كل النمل الذى يعيـش على الأرض حالياً فبعض هذه الصفات



الشكل ١-٧. غياب الخلايا المحتوية على الميلانين من الجلد يسمى البهاق - وقد ورثت الابنه عن أبيها نفس نمط البهاق تماما. (بتصريح من آرون ب. ليرنر).



الشكـل ١-٨. نمله عمرها مائة مليون سنة (سفيكوميرما فرياى) متحفرة في العنبر. هذا الحيوان به العديد من صفات الدبابير ويمثل الحلقة المفقودة في تطور النمـل من الدبابير. وجدت هذه العينة فى نيوجرسى. (بتصريح من فرانك م. كاربنتر - جامعة هارفارد).

أقرب إلى صفات الدبوُّر wasp منها إلى صفات النمل وهو ما يؤيد بقوة الاعتقاد بأن النمل قد تطور عن دبابير قديمة.

والتغيرات التطورية التى تحدث فى خط تطورى غالبا تكون تأقلمية adaptive أى أنها تساعد الأجيال الناشئه على العيش فى بيئتهم بكفاءة أعلى من أسلافهم. وفى الباب الثـاني والثلاثين سوف ندرس مثال صارخ لهذا التطور التأقلمى وهى ظاهرة البهاق الصنـاعى industrial melanism ومن أكثـر الحالات التى درست لهذه الظاهرة حالة استغرقت قرنا كاملا (من حوالى ١٨٥٠ إلى ١٩٥٠) حينما أصبحت الفراشات داكنه اللون جداً في المناطق الصناعية فى إنجلترا. وقد تزامن هذا التغير مع الاختفاء الواسع للأشن بسبب تلوث الهـواء. فالأشجار التى تتغطى جذوعها بالأشن تمد الفراشات

فاتحـة اللون بوسيلة رائعـة للمتهويه بينها الجذوع العاريه تمد الفراشات داكنه اللون بالتمـويه المطلوب (الشكل ٢٣-١٤). واللجوء الى وسائل الحد من تلوث الهواء فى الحقب الحديثة قد سمح بعودة الأشن وفي نفس الوقت بعودة الفراشات فاتحة اللون إلى الظهور تدريجياً. وهنا إذن حالة للتغير التطوري تحدث أمام أعيننا.

والتطور يشمل أكثر من مجرد حدوث تغير تدريجي في خط تطورى واحد فهو يشمل أيضا تزايد أنواع الكائنات حيث أن المجموعات المفردة من الكائنات تنتج نوعين أو أكثر من الذريات. وأعداد أنواع الكائنات التى تعيش على الأرض الآن أكبر من أعداد أنـواع الكائنات التى كانت موجودة فى بداية المليون سنة الأولى من عمر الحياة على الأرض. وعلى سبيل المثال فإن خمس تحت فصائل من النمل التى يوجد الآن بها عده مئات من الأنواع قد إنحدرت من نمل مثل السفيكوميرما. وعلى ذلك فإننا نجد أن الكائنات الحية تختلف عن الكائنات غير الحية من عده أوجه: (١) تنظيمها التركيبي أكثر تعقيداً وتداخلاً، (٢) يحدث فيها الأيض، (٣) تتكاثر، (٤) تستجيب للتغيرات فى البيئة، (٥) كل هذه الصفات تتشكل عبر الزمن بواسطة عملية التطور.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تركيب الكائنات الحيه معقد للغاية . وهذا التركيب يمكن دراسته عند مستويات مختلفة من التعقيد: أجهزة - أعضاء - أنسجه - خلايا - عضيًات - جزيئات كبيرة - جزيئـات صغـيره - ذرات. وتنـظيم المـادة الحية ديناميكى : هناك تبادل مستمر للجزيئات بين أجزاء الكائن الحى وكذلك بين الكائن الحى والوسط المحيط به. وهذا التبادل يسمى بالأيض. وتخليق المواد المعقدة من مواد بسيطة يسمى البناء وتكسير المواد المعقدة إلى أخرى أبسط منها يسمى الهدم. وتمتاز الكائنات الحية بقدرتها على مضاعفة التراكيب التى تنفرد بها وهذا قد يؤدى الى نمو الكائن الحى و / أو تكوين أفراد جدد أي التكاثر. في التكاثر اللاجنسي ينشأ الأفراد الجدد من أب واحد ويكون لهم نفس خصـائص هذا الأب. أمـا في التكاثر الجنسي فيسهم ابوان بالجينات (المورثات) في النسل وعلى ذلك فقد يكون للنسل ملامح مخالفة لما لكل من الأبوين.

تستجيب الكـائنات الحية لتغيرات معينة في الوسط المحيط بها تعمل كمؤثرات.

وهذه الاستجابه (الإحساس) تعتمد على التناسق في نشاطات أجزاء الكائن. وفى الكائنات الأكثر تعقيداً يتم هذا التناسق بواسطه الهورمونات (في النباتات والحيوانات) وبواسطة الأعصاب والعضلات (في الحيوانات فقط).

تتشكل خصائص الكائنات بفعل قوى التطور عبر الزمن. فالصفات التي تساعد على البقـاء تحت الظروف البيئية القائمة يزداد إنتشارها على حساب تلك التي تجعل الكائن الحي أقل تأقلماً مع هذه الظروف. فالنوع الواحد من الكائنات قد يترك أحفاداً من نوعين متميزين أو أكثر. هذه إذن هي الخصائص الأساسية للكائنات الحية. وبينما تشترك جميع الكائنات في هذه الخصائص فإن كيفية التعبير عنها تختلف من كائن إلى آخر وسوف يخصص الجزء الباقي من هذا الكتاب لدراسة كيفية ممارسة الكائنات لهذه النشاطات الحيوية الرئيسية

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ هل تبدو على لهب الشمعه أية خصائص حيويه؟

٢ ــ ماهى أوجه التشابه بين النمو والتكاثر ؟ وما هى أوجه الإختلاف بينهما ؟

٣ ــ كيف يرتبط الأيض بالنمو؟

٤ ــ كيف يرتبط الإحساس بالأيض؟

٥ ــ ماهي أوجه الإختلاف بين التكاثر الجنسى والتكاثر اللاجنسى؟

٦ ــ هل يمكن لمعظم الحيوانات أن تتكاثر لاجنسيا ؟ وهل يمكن لمعظم النباتات ذلك؟

٧ ــ ماهو المؤثر؟

٨ ــ ما هي إستنتاجاتك إذا أعطت كل التجارب الموضحه فى الشكل ١-٣ نتائج إيجابية ولكن بدون التحقق من وجود جزيئات عضوية فى تربة المريخ ؟

CHAPTER 2 الباب الثاني

Scientific Methods الطرق العلميه



الباب الثاني

الطرق العلمية

٢-١ مقدمة INTRODUCTION

ليس هناك شيء غامض أو حتى غير عادى فيما يقوم به العلماء وقد سميت الطرق العلمية لأن هناك طرقا مختلفة لتناول المسائل العلمية وإن كانت جميعها تتطلب اللجوء الى المنطق السليم. وفيما عدا ذلك فان لهم سمات مميزة وإن كانت غير مقصورة على العلم وحده ومن بينها الدقة البالغة في الحكم على البراهين. وميزة أخرى للعلماء هى أن لديهم قدرا كبيرا من تحمل الشك فقد يعمل العلماء لسنوات عديدة بل أحيانا طوال حياتهم محاولين فهم مسألة علمية ما. وعادة يترتب على ذلك تراكم الكثير من الحقائق التى تظل لفترة بدون تفسير واضح بل والتى قد تبدو مؤيدة لتفسيرات متعارضة.

حين ينصت المرء إلى العلماء وقد احتدم الجدل بينهم للدفاع عن آرائهم حول ظاهرة علمية فإن ثقتهم في صحة ما ذهبوا إليه تبدو مطلقة. ولكنهم يدركون فى أعماق قلوبهم أن آراءهم مبنية على إحتمالات وأن دليلا جديدا قد يظهر في أى وقت من الأوقات ليبدل كثيرا من هذه الأراء. وعلى الرغم من أن العلماء لايحتكرون ميزة العمل الشاق لأنفسهم إلا أنهم على إستعداد للعمل ساعات وسنوات طوال بحثا عن حل لمشكلة علمية. فالعلم عمل شاق وعلى كل من يرغب فى الانخراط فى العمل العلمى أن يكون مستعدا أولا للالمام بأساسيات الموضوع وثانيا لتقبل بعض التوترات - التى قد يلطف من مفعولها بعض السعادة - المصاحبة لاستظهار بعض الحقائق من الطبيعة.

وعلى الرغم من أن الطرق العلمية مختلفة بقدر إختلاف العلوم نفسها الا أن هناك نمط يتبعه العلماء في عملهم. فالتقدم العلمى يبدأ بالملاحظات. ومع ذلك فإن العلم

أكبر من مجرد قائمة حقائق. فهدف العلم هو البحث عن تفسير لماذا كانت هذه الحقائق كذلك. وبمجرد الحصول على هذا التفسير - مهما كان أوليا - فإن واحدة من أكثر مراحل العمل العلمى إثاره قد بدأت. ألا وهى مرحلة التنبوء بما يجب مشاهدته تحت ظروف لم تختبر بعد إذا كان هذا التفسير صحيحا. فاذا سارت كل الأمور على ما يرام فان التنبوءات تصدق وحينئذ يمكنك الإعلان عما قمت به وما وجدته على المجتمع العلمي ثم تحبس أنفاسك لترى إن كان بمقدور علماء أخرين أن يؤكدوا ماتوصلت إليه. فإن إستطاعوا ذلك (وغالباً حتى لو لم يستطيعوا) فان المجال أصبح مفتوحا لمزيد من المشاهدات والتفسيرات الأكثر دقة.

دعنا الآن ندرس بالتفصيل هذه الخصائص المميزة للعملية العلمية. وكمساعدة على مزيد من الفهم فإننا سنرى كيف تنطبق هذه الخطوات على مثال محدد لعمل علمى.

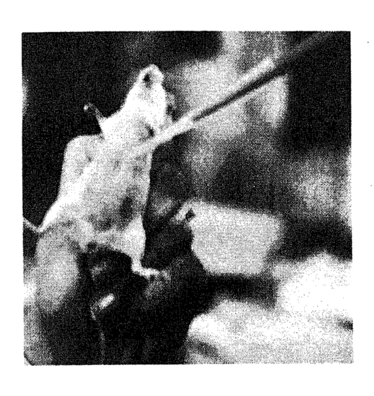
٢-٢ . المشاهدات العلميه SCIENTIFIC OBSERVATIONS

المشاهدات - الحقائق - هى المادة الخام للعلم. مقاسات سلسلة من الحفريات هى مشاهدات. ومجمل صفات الأفراد لنوع ما مشاهدات والقراءات المأخوذة من أحد الاجهزة في المعمل مشاهدات. دعنا الآن نستكشف إحدى المشاهدات التى قد تكون جمعتها بنفسك. فالكثيرون من الناس يصابون بأمراض الحساسيه عند ملامسهٰ بعض الكيماويات لجلودهم. ومثال سيء لذلك هو الحساسيه التى تسببها مادة الأوروشيول الموجـودة فـي نباتات من جنس *Rhus* بما فيها الأيفى السام والبلوط السام والسوماك السام. الأوروشيول في حد ذاته ليس ساماً مثل بعض المبيدات الحشرية إذ أن بعض النـاس يمكنهم ملامستـه دون أن يلحق بهم أذى ولكن القصه تختلف تماما بالنسبة لأولئك الذين يعانون من الحساسية لهذه المادة. فبعد ملامسة النبات (أو حتى أى شيء يكون قد لامس النبات) بحو الى ٢٤ ساعة يبدأ جلد المصاب في الإحمرار ويشعر المصاب برغبة شديدة في حك الجلد كما تظهر غالبا قروح مائية على الجلد. وبعد عدة أيام غير مريحـة يتماثل المصاب للشفاء. هذا مثال لحالـة من حالات الحساسيـة : إستجابة مؤذية من جهـــاز المناعـة بالجسم لمادة غير مؤذيـة في الأحوال العاديـة (جهاز المنـاعـة موصـوف فــى الباب ٢٤) . وهذا النـوع بالـذات من الحساسيـه يسمى

حساسيــة اللــمس contact sensitivity.

وبينما الحساسية للأيفى السام هي أكثر أنواع الحساسية إنتشاراً في أمريكا الشمالية فان هناك أنواعاً أخرى من المواد الكيميائية تحدث أيضاً حساسية اللمس . والمعادن (مثـل النيكـل) المـوجـودة فى الحـلى غالبا ما تسبب مشاكل للعاملين فى الصناعات الكيميائية . ماذا يمكن أن نفعله لمساعدة ضحايا حساسية اللمس ؟ الطريقة الأوضح وهى كذلك أكثر الطرق فاعلية هى تجنب العامل المسبب للحساسية . ولكن ذلك غير ممكن دائما. فما هى الطرق الأخرى التى يمكن أن نساعدهم بها ؟ من هذه الطرق استخـدام بعض العلاجات مثل الدهان لنرى إن كان أحدها يمكن أن يخفف من أعراض الإصابه وهذه هى الطريقة المبدئية . وفى تاريخ الطب أمثلة عديدة لعلاجات تم التوصل إليها بالطريقة المبدئية أى بالتجربة والخطأ. طريقة ثانية هى إيجاد علاج يهاجم سبب المشكلة ولكن لكى ننجح فى هذه الطريقة لابد لنا أن نعرف هذا السبب. ومن بين المشاكل المتعلقة «بالحرب على السرطان» في الولايات المتحدة أنه ليس هناك حتى الآن من لديهم فهم واضح لما يجعل الخلية سرطانية ولاحتى لما ينظم نمو الخلية العادية .

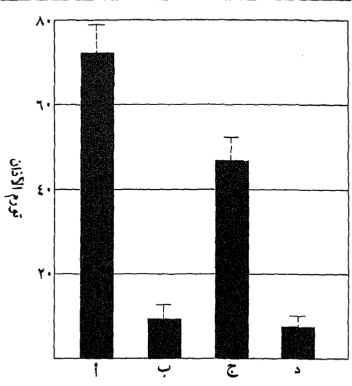
من أجل التوصل إلى حل منطقى لمشكلة حساسية اللمس فانه لزاماً علينا أن نعرف المـزيد عنها. وهذا يعنى إجراء التجارب. ولأن قليلون من البشر هم الذين لديهم إستعداد كى يكونوا محل تجريب في مثل هذا البحث فان علماء الطب غالبا مايحاولون إحـداث أمـراض فى حيوانـات التجارب التى لها بعض الشبه بالانسان. وقد طور الدكتور هنرى كلامان والدكتور جـون مورهيـد ومساعـد وهما نموذج لحيـوان مصـاب بحسـاسية اللمس فـي معـامـل كليـة الطـب بجامعـة كولـورادو . هـذا الحيـوان التجريبـي هـو الفأر . إستخدامـوا لذلك مـركب داينتروفلـوروبنزين (DNFB) وحينما توضع قطرة من DNFB (مذابة في الأسيتون و زيت الزيتون) على جلد الحيوان فانه لا يحدث أى تغير ملحوظ وذلك لأن هذا المركب فى حد ذاته ليس ساما أو كاويا. ومع ذلـك فإن دهـان الجلـد بهـذا المركـب يجعـل الحيـوان حساسـاً لـه . وبعـد بضعـة أيام إذا وضـع المـركب مـرة ثانية على الجلد (وهو ما يعرف بالتحدى challenge) يسبب تغيرات فى الأنسجة تكون مميزة لحساسية اللمس بما فى ذلك حدوث ورم . وكان هؤلاء الباحثون يغطون مساحات (حوالى ٣ سم^{٢}) من الجلـد المحلوق بمادة DNFB



الشكل ٢-١ المعاملة بمادة (داينيتروفلوروبنزين). بعد بضعة أيام تظهر على الفأر علامات الحساسية عند معاملته مرة ثانية بنفس المادة. هذه الظاهرة تسمى حساسية اللمس.
(بتصريح من د. جون و. مورهيد)

بصفة دورية عند منطقة البطن (شكل ٢-١) كما كانوا يتحدون الحيوانات بوضع قطرات من المحلول عند كل أذن حيث كانت الآذان تتورم في الحيوانات الحساسة تماما كما يحدث لي أو لك إذا ما مسحت ورقة من نبات الأيفى السام عليها.

وهكذا فان لدينا الآن حيواناً نموذجياً كى نحاول معرفة المزيد عن حساسية اللمس ومن أول ما اكتشفه هؤلاء الباحثين أن حقن نفس المادة (فى صورة قابلة للذوبان فى الماء) يمنع الاصابة بحساسية اللمس (والدراسون للحساسية يجدون أحيانا أن البشر المصابون بالحساسية يمكن علاجهم بحقنهم بنفس المادة المسببة للحساسية). وبعد الحقن بهذه المادة بمدة أسبوع دُهنت بطون الفئران بمادة DNFB وبعد ذلك بأربعة أيام وضعت قطرات منها على آذانهم وفى هذه المرة لم يظهر سوى ورم طفيف أو لم يظهر أى ورم بالمرة (الشكل ٢ - ٢). لقد أصبحت الفئران الآن أكثر تحملاً لهذه المادة الكيميائية. ومع ذلك فاذا مضى يومان فقط بين الحقن ودهان البطن فان بعض الورم يظهر عند تحدى الآذان وإن كان أقل منه فى الحيوانات المصابة بالحساسية. وحينما يرى المرء تأثيرات جزئية فانه كثيراً ما يرغب فى قياسها ولذلك إستخدم الباحثون الميكرومتر وهو آلة هندسية لقياس السمك بدقة (الشكل ٢-٣).



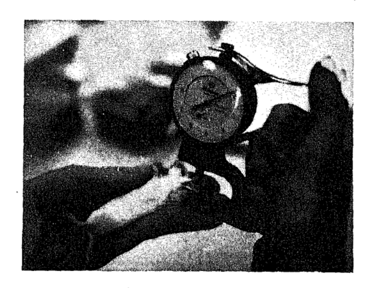
الشكل ٢-٢ إختزال جزئي (المجموعة ج) وكلي (المجموعة ب) في ورم الآذان نتيجة للمعاملة السابقة للفئران بصورة قابلة للذوبان من المادة المسببة للحساسية.

أ- بدون معاملة سابقة (مجموعة قياسية موجبة)

ب- معامل ٧ أيام قبل التحسيس.

ج- معامل قبل التحسيس بيومين.

د- بدون معاملة سابقة وبدون تحسيس (مجموعة قياسية سالبة).



الشكل ٢-٣. يمكن قياس درجة تورم الآذان بدقة باستخدام الآلة المسماه ميكرومتر. (بتصريح من د. مورهيد).

وحتى مع إستخدام سلالات من الفئران تم تهجينها بعناية فان هناك إختلافات فردية فى إستجابتهم. ولذلك فان التجارب جيدة التصميم يجب أن تشتمل على أعداد كافية من الحيوانات لكى تكسب الباحثين ثقة فى أن مشاهداتهم ليست محض مصادفة. وفى هذه الحـالـة فقـد تم إستخدام ٦ فئران فى كل مجموعة تجريبية والتجربة جيدة التصميم يجب أن تشتمـل كذلك على مجموعة قياسية control واحدة أو أكثر. وفى هذه التجارب كانت هناك ثلاث مجموعات قياسية :

١ ـ مجموعـة من الفئـران لم تتلق المعاملة التجريبية (الحقن في الوريد) ولكن تم تحسيسها وتحديها. هذه الحيوانات (وتسمى القياسية الموجبة) نتوقع أن تعطى أعلى إستجابة ممكنة للحساسية فاذا لم تفعل فان أى نقص فى درجة الورم فى المجمـوعـة التجـريبية يكون مشكوكا فى أهميته ربما لأن المركب المستخدم فى التحسيس والتحدى قد تحلل.

٢ ـ مجموعـة أخـرى من الفئران دُهنت آذانها بمـادة DNFB دون أن يسبق تحسيسها بهذه المـادة. وهذه المجموعة من الفئران القياسية السالبة سوف تبين ببساطة مقدار الورم الناتج عن دهان الآذان بهذه المادة.

٣ ـ من المحتمـل أن يكون الحقن بهذه المادة قد جعل الفئران حساسة لأى مادة كيميائيه. وتحسباً لذلك فان مجموعة قياسية ثالثة قد حقنت بهذه الماده ثم تم تحسيسها وتحديها بنفس المادة مع مادة أخرى لا علاقه لها بها. وقد وجد الباحثون أن القدرة على التحمل كانت نوعية. فالفئران التى تحتمل مادة DNFB أبدت رد فعل عادى من ورم الآذان نحو المادة الثانية.

بسبب التباين الفردى فأن المقدار الدقيق للورم يمكن أن يختلف من فأر الى آخر. كيف يمكن إذن تحليل البيانات المتراكمه ؟ الخطوه الأولى هى حساب متوسط للورم الذى حدث فى كل أفراد المجموعة الواحدة وذلك بجمع كل قراءات الميكرومتر وقسمة المجموع على عدد هذه القراءات. القراءات ٤٦، ٤٢، ٤٤، ٤٥، ٤٣ تعطى متوسطا مقـداره ٤٤. ولكن القـراءات ٥٢، ٨٠، ٢٢، ٣٠، ٣٦ تعـطى نفس المتوسط. وبديهى أن الباحث يثق أكثر في المتوسط الذي حصل عليه من المجموعة الأولى من القراءات عن ذلك الناتج من المجموعة الثانية . ومن حسن الحظ أنه يمكن حساب الانتشـار فى مجمـوعة من البيانات. والطريقة الشائعة لذلك هى حساب الانحراف

القياسى للمتوسط ($S\bar{x}$) باستخدام المعادلة .

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \bar{X})^2}{n}},$$

حيث $(X - \bar{X})^2$ هى مربع الفرق بين كل قراءة فردية (X) ومتوسط كل القراءات ($\bar{X}$) و Σ هى مجموع كل هذه الفروق و n هو عدد القراءات الفرديه. وكلما زاد الانحراف القياسى كلما إتسع مجال الابتعاد بين القراءات الفردية والمتوسط الحسابي. وفي الشكل (٢-٤) يتضح أن الانحراف في حالة المجموعة الأولى هو ٤, ١ بينما فى حالة المجموعة الثانية هو ٥, ٢٠ .

X	$\bar{X}$	$(X - \bar{X})$	$(X - \bar{X})^2$	X	$\bar{X}$	$(X - \bar{X})$	$(X - \bar{X})^2$
46	44	2	4	52	44	8	64
42	44	−2	4	80	44	36	1296
44	44	0	0	22	44	−22	484
45	44	1	1	30	44	−14	196
43	44	−1	1	36	44	−8	64
$\bar{X} = 44$			$\Sigma = 10$	$\bar{X} = 44$			$\Sigma = 2104$
$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \bar{X})^2}{n}} = 1.4$				$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \bar{X})^2}{n}} = 20.5$			

الشكل ٢-٤ . حساب المتوسط ($\bar{X}$) والانحراف القياسي ($S\bar{x}$) لمجموعتين من القراءات. وبالرغم من أن المتوسط لهما واحد إلا أن الانحراف القياسي يختلف كثيرا.

وفي العمل العلمى فانه عادة ما يشار بطريقة أو بأخرى إلى مدى تذبذب القراءات المسجلة حول المتوسط الحسابي. وعلى سبيل المثال فانه يمكن تمثيل المتوسط برسم بيانى تتضح فيه قيم الانحراف القياسى التي تتراوح مابين -١ ، +١ . واذا درست علم الاحصاء فانك سوف تعلم أنه يمكن أيضا حساب درجة الثقة التى يمكن أن تضعها في مجموعة من البيانات. وبينما لا نستطيع أن نتطرق هنا إلى إثبات ذلك فان هناك إحتمال أن ٦٨٪ من القيم الحقيقية لأى تأثير نقيسه تقع في مدى إنحراف قياسي ما بين +١ ، -١ . وحيث أن هذه النسبة ليست عالية بالقدر الكافي فان بعض الباحثين يفضل أن يوسع هذا المدى لكى تصبح درجة الثقة ٩٠٪ من وجود القيم الحقيقيه فى هذا المدى. وهو تقريبا ما بين - ٢ ، + ٢ إنحراف قياسى عن المتوسط. والباحثون في الدراسة التي نحن بصددها قد عبروا عن نتائجهم في حدود درجة الثقة ٩٥٪ (الشكل ٢-٢) .

٢-٣ التفسيرات العلمية SCIENTIFIC EXPLANATIONS

ما الذي يمكن أن يفسر حقيقة إكتساب الفئران للمناعه عند حقنهم بمادة كيميائية تسبب لهم فى الظروف العادية حساسية اللمس؟ هناك عدة تفسيرات محتملة لذلك. فربما تكون الحقن قد دمرت بعض مكونات الجسم الضرورية لحدوث حالة الحساسية. أو ربما تكون الحقن قد تسببت فى إنتاج شىء يعطل قابلية الحيوان للاصابه بالحساسية لهذه المـادة. كل من هذين التفسـيرين ليس إلا إفـتراض. فى هذه الـدراسة إختار الباحثون أن يتابعوا الافتراض الثانى أى الذي يفترض أن المناعة (أو التحمل) هي تعطيل وتثبيط للعمليات التي تتسبب فى ظهور الحساسية. كيف يمكن إختبار هذا الافتراض ؟

٢-٤ إختبار الافتراضات TESTING HYPOTHESES

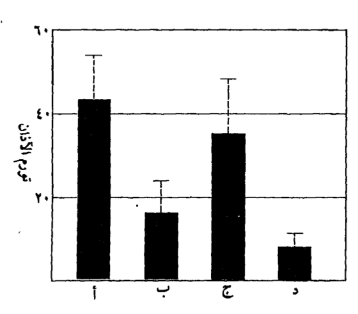
إذا كانت المناعة هى تعطيل فعال فان للمرء أن يتوقع وجود شيء في الفأر المنيع يمكن أن يجعل بقية الفئران منيعة كذلك. هذا التوقع يمكن إختباره بحقن هذا الشيء في فئران عادية وملاحظة إن كانت هذه الفئران قد أصبحت أقل حساسية لمادة DNFB. ولكن ما هو هذا الشيء؟ لقد قرر الباحثون تجربة شيئين مختلفين هما : (١) مصل الدم و (٢) خلايا مأخوذة من العقد الليمفاوية لحيوانات منيعة. لقد فكروا أن العامل المثبط إما أن يكون مادة قابلة للذوبان تجد طريقها إلى الدم أو أن يكون مجموعة من الخلايا في جهاز المناعة تتسبب فى حدوث الحساسية. ولأن العقد الليمفاوية هي جزء فعال من جهاز المناعة (انظر الباب ٢٤-١) فقد قرروا إختبار قدرة خلايا العقد الليمفاوية على إحداث المناعة ضد DNFB .

كانت خطوات تجربتهم على النحـو التالي. حقنوا عدداً من الفئران بمادة DNFB لاحداث المناعة فيهم ضد هذه المادة و بعد ٧ أيام أخذوا منهم إما مصل الدم أو خلايا العقد الليمفاوية وحقنوها في فئران عادية. ثم تم تحسيس هذه الأخيرة (بدهان بطونها بمادة DNFB) وتحـديها بعد ذلك بخمسة أيام (بدهان آذانها بمادة DNFB) وكما حدث في التجارب السابقة فقد كانت هناك حيوانات قياسية: (١) حيوانات لم تحقن الا بالمصل

ولا بالخلايا (حيوانات قياسية موجبة نتوقع أن تعطى أعلى درجة من الحساسية) - (٢) حيوانـات لم تتلق أى معـاملة حتى دهان آذانها بمادة DNFB (حيوانات قياسية سالبة لايظهر بها تورم الآذان كنتيجة للحساسية).

الشكل (٢-٥) يوضح نتائج هذه التجارب وكما ترى فانه يبدو أن الحقن بخلايا العقد الليمفاوية من حيوانات منيعة قد أسبغ المناعة على الحيوانات المحقونة كما يبدو أن الحقن بمصل الدم من الحيوانات المنيعة لم يحدث أثراً يذكر . وقد إستخدمت فى الحالتين عبارة «يبدو أن» لأنه من المحتمل أن الصدفة وحدها هى التى أنتجت التأثير الكبير الواضح فى فئران المجموعة (ب) وإختفاء أى أثر واضح في فئران المجموعة (ج) . وإحتمال حدوث ذلك يعتمد على اشياء منها حجم العينة (٦ فئران فى كل مجموعة) والتـذبـذب في القـراءات الفردية حول المتوسط . وهناك عدة طرق إحصائية لمقارنة مجموعتين من النتائج مثل أ مع ب أو أ مع ج .

والسؤال المـطروح في كل هذه الطرق هو: ما هو إحتمال أن يكون الاختلاف في المشاهدات مردُّه الى الصدفة وحدها (أى أن المعاملات التجريبية لم يكن لها أى أثر في



أ - بدون حقن بالخلايا (مجموعة قياسية موجبة).
ب - محقون بخلايا العقد الليمفاوية من حيوانات مقاومة.
ج - محقون بمصل من حيوانات مقاومة.
د - بدون حقن بالخلايا وبدون تحسيس (مجموعة قياسية سالبة)

الشكـل ٢-٥. يمكن جعـل الفئران العادية منيعة للاصـابـة بحساسية اللمس لمادة DNFB إذا حقنـت بخلايا العقد الليمفاوية من فئـران منيعة لهذه المادة. أما نقـل مصـل الـدم فليس له نفس التأثير. ويدل ذلك على أن المنـاعة ضد المادة المسببة للحساسية تنتقل مع الخلايا (تسمى الخـلايـا المثبـطة). هذه البيـانـات من بحث منشور لفانوفاك وآخرين عام ١٩٧٤.

الواقع)؟ والإفتراض بأن المعاملات التجريبية لم يكن لها أثر معروف باسم إفتراض الصفر. ويشعر الكثير من الباحثين بأنه إذا كان الإحتمال (يرمز له بالرمز P) بحدوث الاختلاف المشاهد أقل من ١ في كل عشرين ($P = < 0.05$) فإن إفتراض الصفر يكون ملغيا ويكون الإختلاف المشاهد حقيقيا. وإذا كان الاحتمال أكبر من 0.05 فانه عادة ما يعتبر الاختلاف غير حقيقى.

٢-٥ نشر العمل العلمى REPORTING SCIENTIFIC WORK

العلم نشاط مستمر وفى الحقيقه لا نبالغ إذا قلنا إن العلم الذي يمارس في السر ليس علما بالمرة. ولا تصبح الحقائق والافتراضات الجديدة جزءاً من العلم إلا عندما يعلم بها المجتمع العلمي. لذا كان توصيل العمل العلمى إلى كل من يهمه الأمر من أهم مسؤليات العلماء. و غالبا ما تكون الخطوة الأولى فى هذا السبيل حينما يجتمع العلماء مع بعضهم. ومع ذلك وحتى نضمن للعمل العلمي موقعا دائما في البناء العلمي فان ذلك العمل ينشر على هيئة ورقة تقدم إلى إحدى المجلات العلمية. وعادة لاتقبل هذه الورقة للنشر إلا بعد إجازتها من عدة علماء مرموقين من معامل أخرى يقومون بدور المحكمين. وغالبا ما يقترح هؤلاء المحكمون بعض التعديلات على الورقة أو حتى إجراء المزيد من التجارب قبل قبول الورقة للنشر. وفي مجالات علوم الحياة عادة مايتبع أسلوب تنظيمي معين في كتابة الأوراق حيث تقسم الورقة الى عدة أقسام هى:

١- **المقدمة**. هذا القسم من الورقة يصف الموضوع أو المشكلة التي تناولتها الدراسة (في هذه الحالة: هل يمكن نقل المناعة الى الحيوانات ؟ وإذا كان ذلك ممكناً فبماذا). تشمل المقدمة ذكر التقارير والبحوث السابقة لنفس العلماء ولغيرهم والتي كانت بمثابة الأساس بالنسبة لعملهم.

٢- **المواد و الطرق**. هنا توصف المواد المستخدمة بكل دقة (مثل نوع الفئران ومصدر المواد الكيميائية) والطرق المتبعة (مثل المنطقة المدهونة من الجلد). والغرض من هذا القسم هو إعطاء الباحثين في المعامل الأخرى كل التفاصيل التي تلزمهم إذا مارغبوا في إعادة نفس التجارب بكل دقة. وعندما تكون هناك طرق عديدة ومعقدة فانه من المقبول ذكر الأوراق المنشورة سابقاً وبها كل تفاصيل هذه الطرق.

٣- **النتائج**. هنا يذكر المؤلفون ما حدث في تجاربهم نثراً ولكن عادة ما يكون ذلك مصحوباً بالرسوم البيانية والجداول والصور وما إلى ذلك.

٤- **المناقشة**. في هذا القسم يوضح المؤلفون أهمية ما توصلوا إليه وهنا كذلك يوضحون إلى أي مدى تتفق نتـائجهم مع بعض الافتراضات أو تعارضها مع إفتراضات أخرى كما يذكر إن كانت النتائج متعارضة مع نتائج تجارب مشابهة أجريت في معامل أخرى كما يمكنهم محاولة تعليل أسباب هذا التعارض.

٥- **الشكر**. في هذا الجزء الموجز والهام يتوجه المؤلفون بالشكر إلى كل من ساعدهم في هذا البحث. ويشمل ذلك الفنيين (الذين من الممكن أن يكونوا قد أجروا معظم التجارب فعلا) والعلماء الآخرين الذين أمدوهم ببعض المواد والنصائح وغالباً الشخص الذي قام فعلا باعداد النص للنشر.

٦- **المراجع**. توجد في هذا القسم قائمة دقيقة بكل المراجع التي ذكرت في متن الورقة وأغلب هذه المـراجـع يكون في صوره أوراق أخرى. وتشتمل المراجع على كل التفاصيل التي تمكن أي شخص من العثور عليها. وهذا يعني أن كل مرجع يجب أن يشتمل على إسم المؤلف أو أسماء المؤلفين والمجلة أو الكتاب الذي نشر فيه الموضوع ورقم العدد من المجلة التي نشرت فيها الورقة ورقم الصفحة التي تبدأ الـورقـة بها. وأحيانا يذكر كذلك العنوان الكامل للورقة إلا أن بعض الأوراق العلمية قد تحمل عناوين تبلغ من الطول ما يؤدي إلى التغاضى عن العنوان في قائمة المراجع.

٧- **الملخص أو الموجز**. هذا القسم يشتمل فقط على خلاصة الأقسام السابقة وينبغي أن يكـون مختصراً بقدر الامكان وينقل للقاريء الهدف من التجارب والنتائج وأهمية ما أمكن التوصل إليه. وغالباً ما يأتي الملخص في بداية الورقة وليس في نهايتها.

٢-٦ قابلية العمل العلمي للتكرار REPRODUCIBILITY OF SCIENTIFIC WORK

الخاصية الوحيدة المميزة للعلم هي قابليته للتكرار. فاذا لم يتمكن العلماء من تكرار الحصول على النتائج الأولى يصبح لزاماً عليهم أن يعتبروها عديمة القيمة. وتتكرر هذه المشكلة بكثرة مدهشة. ويرجع سببها عادة إلى عامل لم يؤخذ في الاعتبار أثناء التجربة وبـالتـالي لم يمكن التحكم فيه. وبقـدر من حسن الحظ فان العلماء اللذين أجـروا التجارب يكتشفون بأنفسهم عدم قابلية نتائجهم للتكرار وهذا هو السبب الذي يجعل العلماء يعيدون تجاربهم عدة مرات قبـل نشرها في ورقة علمية. وفي حالات أخرى

لايستـطيع البـاحثون في معامل أخرى الحصول على نفس النتائج الواردة في بحوث منشورة. وعندما يحدث ذلك فإن على كل الأطراف أن يجتمعوا معاً للبحث عن سبب إختلاف النتائج التي توصلوا إليها وغالباً ما يكون ذلك بسبب عدم إستعمال نفس المواد والطرق بالضبط. ومع ذلك فأحيانا يتم اكتشاف عيب جوهري في تصميم أو إجراء التجارب وفي أحيان أخرى لايمكن الوصول إلى سبب نجاح التجارب مرة وفشلها مرة أخرى. وعلى أى الأحوال فإن الفشل في تأكيد النتائج يتم نشره أيضاً. وبينما يسبب ذلك حرجاً شديداً للباحثين الأصليين فإنه يمثل أحد أهم أوجه القوة في العلم : نظامه الداخلي للتصويب الذاتي .

وفي أغلب الحـالات يرجـع عدم قابلية النتائج للتكرار إلى خطأ غير مقصود وفي حالات نادرة لايمكن تكرار النتائج لأنها ملفقة. وهذا بالطبع شيء مفزع للجميع. فاذا أصبح هذا التلفيق معروفا على نطاق واسع فانه قد يتسبب في قدر كبير من إثارة الجماهير . ولكني أعتقد أن مثل هذه الانحرافات النادرة تبين بوضوح تام القوة الهائلة للعلم بدلاً من أن تلقي بظلال من الشـك حول العمـل العلمي. وليس من بين النشاطات البشرية مايتم فيه إكتشاف وتصحيح الأخطاء بالسرعة التي يتم بها ذلك في مجال العلوم . واني لواثق أنه يمكنكم تذكر عدداً من مجالات النشاط البشري وقعت فيه أخـطاء مرت لسنوات طويلة دون تصحيح وسببت أذى كبيراً. فالعلماء الملفقون لايؤذون إلا أنفسهم كما يلحق بهم العار وتنتهي حياتهم العملية ويظل العلم في تقدم بنفس السرعة أو أسرع من ذي قبل.

٢-٧ البناء على عمل الاخرين. BUILDING ON THE WORK OF OTHERS

نادراًماينبثق إكتشاف علمي مفاجيء تماماً وحينما يحدث ذلك فانه يخلق ثورة في مفهوم العلماء لهذا العالم المحيط بهم كما يفتح أفاقاً جديدة بالكامل للبحث العلمي . ونـظرية التـطور لداروين وقـوانـين منـدل للوراثـة (الباب ١٠) هي أمثلة لمثل هذه التطورات الثورية.

ولكن أغلب العلم عبارة عن إضافة لبنة جديدة إلى الصرح الذي شيده السابقون ببطء وكثـير من المشقة. وفي الواقع فانه يمكن التوصل إلى شجرة العائلة التي تتتبع

تاريخ أي إكتشـاف علمي (بما في ذلـك اكتشـافـات داروين ومنـدل إلى حد ما) والأسلوب العلمي في البناء على ماعمله الآخرون ليس إلا مظهراً آخر يوضح كيف أن العمل العلمي عمل جماعي .

وظهـور تقنية جديدة غالباً مايضع الأساس لتطورات متلاحقة في دروب علمية مختلفة . خذ مثلاً التقدم الذي حدث في علوم الحياة عند إكتشاف المجهر الضوئى وفيما بعـد المجهـر الأليكـتروني . وفي الأبواب التالية سوف تعلم عن الكثير من الوسائل التجريبية الأخرى . وقد نشأت كل منها في محاولة لحل مشكلة معينة ومع ذلك فقد تولاها علماء في معامل أخرى وشرعوا في تطبيقها لحل مشاكلهم .

وبالمثل فإن ظهور تفسير (أو افتراض) جديد في أحد المجالات العلمية يحفز العلماء في المجالات المرتبطة به إلى إعادة النظر في دراساتهم على ضوء الأفكار الجديدة . نظرية التطور لداروين على سبيل المثال كان لها تأثير ضخم على كل التخصصات التي تدخل في نطاق علم الأحياء وبعض التخصصات الأخرى كذلك . ولايزال العلماء في مجالات متباعدة مثل الكيمياء الحيوية وسلوك الحيوان يسترشدون في عملهم بنظرية التطور الى يومنا هذا .

٢-٨ العلوم الأساسية في مقابل العلوم التطبيقية .
BASIC VERSUS APPLIED SCIENCES.

التمييز بين علوم أسـاسية وعلوم تطبيقية تمييز بين الأهـداف أكثـر منـه تمييز بين الـوسائل . فكل القواعد والمعايير التي ناقشناها تنطبق على كل منهما . ومع ذلك فان الدافع وراء كل منهما قد يختلف بعض الشيء . فالباحثون في العلوم التطبيقية لديهم مشاكل عملية يبحثون عن حلول لها . وأغلب البحوث الطبية والزراعية تطبيقية . وعلى الجـانب الاخـر فان البـاعث على اجـراء بحـوث في العلوم الأسـاسية هـو حـب الاستطلاع - الرغبة في معرفة المزيد عن كيفية عمل الطبيعة .

وكـلا النوعين من البحوث ليس فقط مهنة شريفة وشاقة بل إنهما يعتمد ان على بعضهـما البعض . فالعلوم التطبيقية لاتلبث أن تفقد قوة إندفاعها لولا ما تغذيها به

العلوم الأســاسية بصفــة دورية من أفكــار واكتشــافات. (يذكر البعض أن المصباح الكهربي لم يكن ليكتشف في معامل البحوث الملحقة بمصنع للشموع). وفي المقابل فان الكثير من البحوث الأساسية يعتمد على مايتم تطويره من معدات وأجهزة وفي الغالب لايتم ذلك إلا في معامل مخصصة للبحوث التطبيقية.

يعتمد البحث حالياً في العلوم البيولوجية إلى حد كبير على الأجهزة (مثل المجهر ومقياس الأس الهيـدروجينى) وعلى المباديء والوسائل المعمول بها في مجالات الكيمياء والفيزياء . والحقيقة هي أننا لايمكن أن نكتسب إلا فهما سطحياً للغاية لمعنى الحياة مالم يكن لدينـا بعض المعـرفـة بالأسس الكيميائية والفيزيائية للحياة وهـذا بالتأكيد صحيح بالنسبة لعلماء وظائف الأعضاء وعلماء الأحيـاء الدقيقة وغيرهم من العاملين في المعامل. ولكنه صحيح أيضاً بالنسبة لعلماء الأحياء العاملين خارج المعامل أو من كانـوا يسمون «الطبيعيون» في السنوات التي خلت. وزملائي الذين يعملون خارج المعامل في هذه الأيام عليهم الاعتماد على المعلومات والوسائل الكيميائية تماما كزملائي الذين يشاركونني المعمل، علماء تطور الأحياء عليهم الآن البحث عن أدلة كيميائية تقودهم إلى العلاقات التطورية بين الكائنات الحية، الدراسون لسلوك الحيوان يجدون العديد من الاشارات الكيميائية التي تتفاعل بها الحيوانات والنباتات مع بعضها، هؤلاء الـذين تتسع إهتماماتهم لتشمل كيفية عمل نظم بيئية بأكملها يجدون أن أى تحاليل مفيدة تستعصى عليهم حتى يبــدؤا في إستخـدام الأجهـزة والـوسـائـل الكيميائية والفيزيائية. لماذا إذن التـأخـير؟ فلنركز إنتباهنا الآن على بعض المبادىء الكيميائية والفيزيائية الأساسية التي تبنى عليها الحياة.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تبدأ كل الأعمال العلمية بالمشاهدات: حقائق الطبيعة. ومحاولة وضع شرح لماذا تكون هذه الحقائق على هذا النحو هي الإفتراض. والإفتراض هو تفسير أولى يمكن إختبـاره في مواقف جديدة. وغالبا مايتطلب الاختبار تصميم وإجراء تجارب. وكل تجربة لابد أن تصمم بعنايـة وأن تشتمـل علـى قياسيـات Controls وحينما تتجمع بيانـات كمية فينبغي تحليلها إحصائياً حتى يمكن حساب إحتمال أن تكون النتائج ليست وليدة الصدفة وحدها.

إذا لم تكن النتائج هي ما تنبأنا به على أساس الافتراض فإن الافتراض يكون غير ذي قيمة. أما إذا كانت النتائج هي ماتنبأ به الافتراض فان ثقة المرء تزداد في صحة هذا الافتراض. وكلما زادت الثقة في صحة الافتراض كلما بدأنا نشير إليه كنظرية أو حتى كقانون. ولكن حتى قوانين العلم تكون دائماً معرضة لمزيد من التحسين ولذلك فبينما يتضح أن بعض التفسيرات العلمية عديمة القيمة (أو خاطئة) فإنه لايمكن أبداً إثبات أنها صحيحة على وجه الاطلاق.

ولابد من نشر المشاهدات والافتراضات الجديدة حتى تصبح جزء من العلم وغالباً مايكون ذلك في صورة ورقة علمية. والورقة العلمية لابد أن تشتمل على المعلومات اللازمة للعاملين في معامل أخرى حتى يستطيعوا أن يكرروا العمل المنشور.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١- احسب المتوسط ($\bar{X}$) والإنحراف ($S\bar{x}$) للمجموعة الآتية من القراءات: ١,٣ - ١,٥ - ٠,٩ - ٢,٦ - ٠,٨ - ١,١.

٢- إقرأ ورقة علمية قصيرة ثم أكتب بنفسك موجزاً لها.

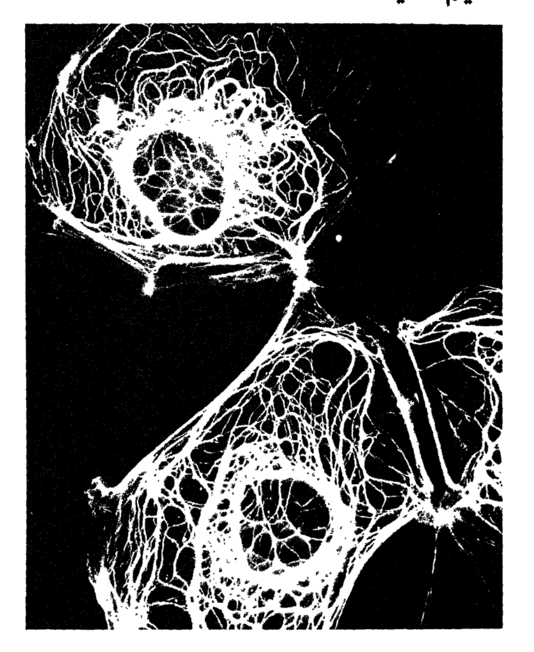
المراجع : REFERENCES

1- SCHEFLER, W.C., Statistics for the Biological Sciences, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1969.



PART II القسم الثاني

THE ORGANIZATION OF LIFE تنظيم الحياة



تنظيم خيوط الكرياتين في خليتين حيوانيتين. (عن أوزبورن وآخرين ١٩٨٠).

CHAPTER 3 الباب الثالث

الأسس الكيميائية للحياة : مبادىء

THE CHEMICAL BASIS OF LIFE : PRINCIPLES

الباب الثالث

الأسس الكيميائية للحياة: مبادىء

قد يبدو أمراً غريباً أن يخصص كتاب في علوم الأحياء جزءاً منه لدراسة الكيمياء. ولقد كان هناك وقت كانت فيه كل معلوماتنا عن الكائنات الحية مستمدة من الملاحظات الدقيقة لعلماء الأحياء الذين يستخدمون في دراساتهم المواد الحافظة وأجهزة تقطيع الأنسجة وقليل من الأصباغ والمجاهر. ومع ذلك عندما وجهت الوسائل التحليلية للكيميائيين والفيزيائيين نحو العينات الحيوية فقد أمكن تحليلها إلى وحدات أصغر بكثير مما كان يشاهد بالمجهر. هذه الوحدات هي الذرات والجزيئات. وكنتيجه لهذه الدراسات فقد إتضح أمران:

١- على الرغم من أن الكائنات الحية والخلايا التي تتركب منها (بقدر أقل) تبدو متباينة في مظهرها إلا أن تركيبها الكيميائي الأساسي متشابه إلى حد كبير.
٢- على الرغم من أن التركيب الكيميائي للمادة الحية معقد جداً إلا أنها مبنية على نفس المواد والأسس كتلك الموجودة في عالم الكائنات غير الحية.

هذان الاكتشافان كانت لهما أثار بعيدة المدى. فقد حولا إنتباه علماء الأحياء من أوجه الاختلاف العديدة بين الكائنات الحية إلى أوجه التشابه العديدة بينها. وقد توافق هذا التحول مع التوسع الذي حدث في دراستنا للكائنات الحية. فلم يعد علماء الأحياء يقنعون بدراسه الشكل الظاهري أي طريقة تجمع الخلايا والأنسجة والأعضاء مع بعضها لتركيب جسم الكائن. وعليهم الآن أن يتساءلوا كيف تعمل أجزاء هذا الكائن مع بعضها أى لابد لهم أيضاً من دراسة وظائف الأعضاء. ولكى يتوصلوا الى ذلك عليهم أن يفهموا التركيب الكيميائي للخلية الحية والأسس الكيمائية التي تنظم نشاطها.

٣-١ صور المادة. FORMS OF MATTER

حتى الآن فإن المكان الوحيد المعروف بوجود حياة، ومن ثم خلايا حية، في الكون هو كوكبنا. هنا في هذه الطبقة الرقيقة للغاية التي تغطى سطح الارض يوجد هذا التركيب الفريد للمادة التي تحمل صفات الحياة. وتعيش المواد الحية محاطة بوسط غير حي وفي تفاعل دائم معه وهو يشمل:

١- الوسط الأرضي. التربة والصخور القريبة من سطح الأرض.

٢- الوسط المائي. المياه العذبه والمالحة بالأرض.

٣- الغلاف الجوى.

ويتفاعل مع كل من هذه الأوساط الثلاثة للأرض الوسط الحيوى biosphere : هذه المنطقة الضيقة حيث تعيش المادة الحية وتتفاعل مع الوسط الأرضى والوسط المائي والغلاف الجوى. والوسط الحيوى رقيق للغاية حيث أن الغالبية العظمى من الكائنات الحية توجد في طبقة لايتعدي سمكها ٢٠ كم (١٢ ميل) بينما نصف قطر الأرض يبلغ حوالي ١٢٧٥٠ كم. وكل من يحاول تحليل الموقف سوف يقدر تماماً أبعاد الوسط الحيوى. ولكن إستكشافات الفضاء وما أتاحته من فرصة في الستينيات لمشاهدة كوكبنا من أعلى هي التي أعطتنا فكرة واقعية عن مدى الطبيعة الهشة لهذا الغشاء من الهواء والماء والتربة الذي لابدلنا ولكل المخلوقات الحية الأخرى أن نتعايش فيه (الشكل ٣-١).

مم تتكون الأوساط الأربعة ؟ إذا إختبرنا بعناية عينة من الصخور أو التربة فإننا سنؤخذ بما فيها من تباين. أي أننا سنجدها مكونة من عدة مكونات يمكن التعرف عليها مثل حبيبات الرمل ورقائق المايكا. ويبدو الماء أكثر تجانساً في تركيبه من التربة ولكن عندما نبخر جزءاً من ماء البحر فاننا نحصل على راسب يحتوي على عدة أملاح مختلفة. أما الغلاف الجوى فإنه أكثر تجانساً في تركيبه من البحر ولكن هنا أيضا يتضح من التحليل الدقيق وجود عدة مكونات. فاذا ما وضعنا على سبيل المثال فأراً حياً في وعاء محكم الأغلاق فان تركيب الهواء داخل الوعاء سوف يتغير بحيث أن الفأر لايستطيع في النهاية أن يتنفسه - فقد إنتهى الأكسجين وحل محله ثاني أكسيد الكربون.

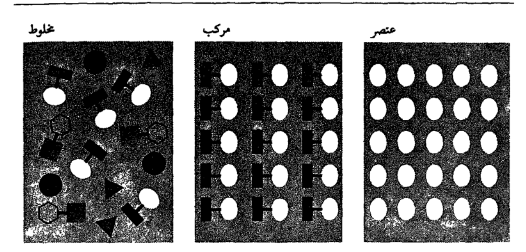


الشكل ٣-١. الأرض (بتصريح من ناسا).

وكل هذه الصور للمادة - التربة والماء والهواء - هي أمثلة للمخلوطات (الشكل ٣-٢). وماذا عن المادة الحية؟ إستخرج العصارة من الخلايا الحية لأي كائن حي وسوف تواجه بأكثر المخلوطات تعقيدا. ومن أكبر مهام أولئك الذين يريدون فهم وظائف الخلايا هو إيجاد السبل لفصل مكونات الخلية حتى يمكن دراسة كل منهم بمعزل عن الاخرين.

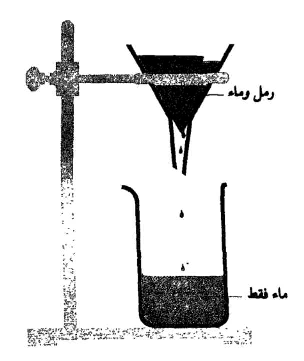
فصل مكونات مخلوط SEPARATING THE COMPONENTS OF A MIXTURE

لكي نفصل مكونات المخلوط فاننا نستغل بعض خواص هذه المكونات والتي تميز كل منهم عن البقية. فمثلا إذا كانت بعض هذه المكونات أكبر من غيرها فانه يمكننا دفع المخلوط خلال حاجز مثقب بحيث تسمح ثقوبه بمرور المكونات التي يكون حجمها أصغر فقط من هذه الثقوب. وعلى ذلك فإنه بالترشيح من خلال لوح من الورق نستطيع أن نفصل مخلوطاً من الرمل والماء (الشكل ٣-٣). وربما كنا نرغب في فصل مخلوط من السكر والنشا، لذلك نضع المخلوط في كيس من السلوفان محاط بالماء فتخرج جزيئات السكر الصغيرة من خلال الثقوب الموجودة (الشكل ٣-٣) في السلوفان

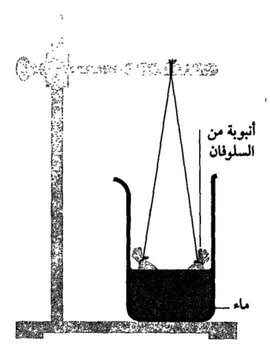


الشكل ٣-٢ : رسم تخطيطي لصور المادة. المخلوط يتكون من نسب متغيرة من الجزيئات والذرات. النوعان أو أكثر من الذرات التي يتكون منها المركب توجد بنسب ثابتة. العنصر يتكون بالكامل من نوع واحد من الذرات.

بينما تبقى جزيئات النشا الأكبر داخل الكيس. وتسمى هذه العملية بالانتشار الغشائي (الشكل ٣-٤). وهناك طرق أخرى لفصل مكونات المخلوط تستغل فيها الاختلافات في الشكل أو الكثافة أو قابلية الذوبان أو الشحنه الكهربية للمكونات المختلفة.



الشكل ٣-٣. الترشيح. أي حبيبات مثل الرمل من الكبر بحيث لاتمر خلال مسام الورق يمكن فصلها بهذه الطريقة عن الجزيئات الأصغر منها مثل جزيئات الماء.

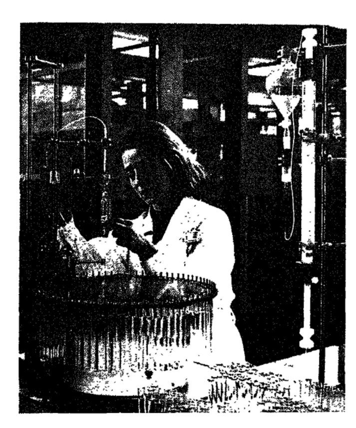


الشكـل ٣-٤ . الانتشار الغشائي. المسام في قطعة السلوفان من الصغر بحيث تحجز الجزيئات الكبيرة (مثل النشـا وبياض البيض) بداخلها بينما الجـزيئـات الصغـيرة وأيونات (مثل الجلوكوز و Cl , Na) تمر بسهولة الى الماء المحيط بها. الانتشار الغشائي هو فصل الجزئيات الكبيرة عن الجزيئات الصغيرة والأيونات في محلول.

الشكل (٣-٥) يوضع جهازاً يسمى العمود الكروماتوجرافي (أو الفصل اللونى) ويستعمل لفصل الجزيئات الموجودة في مخلوط. يملأ العمود بمادة صلبة تعوق مرور جزيئات معينة أكثر مما تعوق مرور جزيئات أخرى. فعلى سبيل المثال إذا امتلأ العمود بمادة صلبـة تحمـل شحنات سالبة ثم سكب فيه مخلوط من جزيئات بعضها سالب الشحنـة وبعضهـا موجب فانه يعوق مرور الجزيئات موجبة الشحنة. ويحدث ذلك بسبب التجـاذب بين الشحنـات الكهربية المتعاكسة. وبذلك نستغل الاختلاف في الشحنات الكهربية في فصل الجزيئات الموجودة في مخلوط على الأقل جزئيا.

وفي الجانب الآخر اذا إمتلأ العمود بحبات شبه صلبة تسمح بدخول الجزيئات الصغـيرة فيها بينهـا ولا تسمح للجزيئات الكبيرة بذلك فانه يمكننا فصل الجزيئات الموجودة في مخلوط على أساس الاختلاف في حجمها. وعند إضافة مثل هذا المخلوط عنـد قمـة العمـود فإن الجزيئات الصغيرة توزع نفسها في حيز أكبر من الحيز المتاح للجزيئات الكبيرة (الشكل ٣-٦). ويترتب على ذلك أن تمر الجزيئات الكبيرة بسرعة أكبر خلال العمود وبذلك يتجزأ المخلوط الى مكوناته.

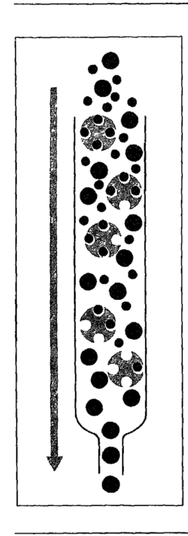
وعلينا مراعاة عدة نقاط عند إستعمال طرق الفصل المختلفة. أولا : هذه الطرق



الشكل ٣-٥. كروماتوجرافي العمود. محلول به خليط من جزيئات البروتينات ينقط عند قمة عمود الكروماتوجرافي في اليمين. مادة الحشو في العمود تفصل الجزيئات على أساس الحجم. ويتم تجميع البروتينات عند مغادرتها لقاع العمود في أنابيب إختبار منفصلة. (بتصريح من شركة التجهيزات المتخصصة المحدودة).

لاتحتاج بصفة عامة الى الكثير من الطاقة حيث أن قوى التماسك بين المواد المختلفة مع بعضها تكون ضعيفة. ثانيا: أن نسب المكونات في المخلوط متغيرة. فبعض الخامات تكون غنية بالحديد وبعضها فقير فيه وماء البحر يكون أكثر ملوحة في بعض المناطق عنه في غيرها وحتى الغلاف الجوى توجد به إختلافات طفيفة في كميات المكونات مثل ثاني أوكسيد الكربون وبخار الماء. أما بالنسبة للخلايا فاذا أخذنا محتواها المائي على سبيل المثال فانه يتراوح بين ٦٠٪ إلى ٩٠٪.

إستنتاج ثالث نتوصل إليه من عملية فصل مكونات المخلوط هو أن هذه المكونات المفصولة تحتفظ بخواصها. فالهواء يساعد على الاشتعال لأن أحد مكوناته وهو الأوكسجين يساعد على الاشتعال. والخواص الكيميائية لملح الطعام ثابتة سواء كان في مخلوط (ماء البحر) أو معزولاً كمادة نقية. والهدف من عملية فصل مكونات المخلوط إذن هو عزل المواد النقية المختلفة التي يتألف منها هذا المخلوط.



الشكل ٣-٦. الفصل الكروماتوجرافي بواسطة حجم الجزيئات. يملأ العمود بكريات نصف صلبة تسمح بدخول الجزيئات الصغيرة (الملونة) ولاتسمح بدخول الجزيئات الكبيرة (الرمادية) بينها. وعندما يوضع خليط منها عند قمة العمود تتوزع الجزيئات الصغيرة في حجم من المذيب أكبر مما تتوزع فيه الجزيئات الكبيرة ومع تحرك المذيب الى أسفل العمود تنتقل معه الجزيئات الكبيرة أسرع من الجزيئات الصغيرة.

المــواد النقيــة PURE SUBSTANCES

بعض المـواد النقية التي نفصلهـا من المخلوط لايمكن تجزئتهـا أكثـر من ذلك. الأكسجين مثال لذلك. فالأكسجين الموجود في الهواء هو أحد المواد البنائية الأساسية للمادة، هو اذن أحـد العنـاصر. والبعض الآخـر من المـواد النقية يمكن تجزئته إلى مكـوناته، هذه المواد تسمى المركبات. ملح الطعام (كلوريد الصوديوم) مثال لذلك والماء مثال آخر. فاذا مررنا تياراً كهربائياً في ملح طعام منصهر فإننا سنحصل على مادتين جديدتـين: الصـوديوم - وهو معدن لامع سريع التفاعل حتى اننا لابد أن نحفظه بمعزل عن الهواء - و الكلور وهو غاز مائل إلى الاصفرار وسام جداً. في هذه العملية حللنا مركب (كلوريد الصوديوم) الى عنصرية.

ماهي الاختلافات بين هذه العملية وفصل مكونات المخلوط المبينة سالفا؟ أولاً هذه العملية تتطلب قدراً كبيراً من الطاقة وذلك لأن القوى التي تربط جزيئات المركب قد تكون كبيرة جداً. ثانيا مكونات المركب موجودة بنسب ثابتة، فاذا مررنا تياراً في أي عينه من كلوريد الصوديوم فان النسب الوزنية للناتجين ستكون دائما ٢٣ جزء من الصوديوم إلى ٣٥ر٥ جزء من الكلور. وبالمثل إذا مررنا التيار في الماء يتولد الهيدروجين والأكسجين بنسبة لا تتغير هي ١٦ : ٢ (السبب وراء هذه النسب سنجده مشروحاً في الجزء ٣-٣)). وأخيراً علينا أن نتذكر أن خواص مكونات المركب ليست هي نفس خواص المركب نفسه. فكلا من الصوديوم والكلور ضار جداً بالأحياء وعلى النقيض من ذلك فان كلوريد الصوديوم هام جداً في غذاء الحيوانات.

٣-٢ العناصر ELEMENTS

بتحليل المركبات بطرق كيميائية يمكن في النهاية إختزالهم الى عناصر مثل الهيدروجين والأوكسجين المكونين للماء. ومهما بلغت درجة تعقيد العينات من القشرة الأرضية أو الغلاف المائى أو الغلاف الهوائي فإنه يمكن في النهاية إختزالها إلى عدد بسيط من بين القائمة التي تشتمل على ٩٠ عنصر (هناك عناصر أخرى معروفة ولكنها غير مستقرة حتى إنه لم يمكن إكتشافها على الأرض إلا بكميات ضئيلة ومن خلال وسائل التخليق المعروفة في علم الفيزياء النووية). الشكل (٣-٧) يبين التركيزات النسبية لأكثر العناصر إنتشاراً بالقرب من سطح الأرض. والمخلوطات والمركبات في المادة الحية بالغة التعقيد ولكنها في النهاية أيضا يمكن إختزالها إلى عناصر قليلة - فقط ٢٥ أو نحو ذلك. يبين الشكل (٣-٧) أكثر هذه العناصر انتشارا في المادة الحية.

هناك نقطتان ينبغي ذكرهما حول هاتين القائمتين. الأولى هي أن المادة الحية لا تستغل إلا كسراً ضئيلا من العناصر المتاحة بل إن نسب تلك العناصر التي تستمدها من الوسط المحيط بها تختلف كثيراً عن نسبها في هذا الوسط. وبعبارة أخرى يمكن القول بأنه من خصائص الحياة أنها تستمد العناصر النادرة من الوسط غير الحي وتقوم بتركيزها في خلايا حية. فالهيدروجين والكربون والنتروجين يشكلون معاً أقل من واحد بالمائة من الذرات الموجودة في القشرة الأرضية بينما يمثلون ٧٤٪ من ذرات المادة الحية. وقدرة الحياة على تركيز العناصر النادرة لافتة للنظر فعلاً. وبعض الحيوانات البحرية

الشكل ٣-٧. التركيب العنصري للقشرة الأرضية والجسم البشري. يمثل كل رقم النسبة المئوية لمجموع أعداد الذرات الموجودة فمثلاً هناك ٤٧ ذرة أوكسجين من بين كل ١٠٠ ذرة موجودة في عينة تمثل القشرة الأرضية بينما هناك ١٩ ذرة كربون فقط من بين كل ١٠٠٠٠ ذرة من القشرة الأرضية.

تركيب القشرة الأرضية		تركيب الجسم البشري	
أوكسجين	٤٧	هيدروجين	٦٣
سيليكون	٢٨	أوكسجين	٢٥,٥
الومينوم	٧,٩	كربون	٩,٥
حديد	٤,٥	نيتروجين	١,٤
كالسيوم	٣,٥	كالسيوم	٠,٣١
صوديوم	٢,٥	فوسفور	٠,٢٢
بوتاسيوم	٢,٥	كلور	٠,٠٣
مغنيسيوم	٢,٢	بوتاسيوم	٠,٠٦
تيتانيوم	٠,٤٦	كبريت	٠,٠٥
هيدروجين	٠,٢٢	صوديوم	٠,٠٣
كربون	٠,١٩	مغنيسيوم	٠,٠١
البقية	أقل من ٠,١	البقية	أقل من ٠,٠١

يمكنها تراكم عناصر مثل الفاناد يوم واليود في خلاياها حتى تصل إلى تركيز ألف مرة أو أكثر قدر تركيزها في مياه البحر المحيطة بها. ولقد فكر البعض في الحصول على اليورانيوم من بعض الطحالب التي يمكنها إستخلاصه من ماء البحر وتركيزه في خلاياها.

والنقطة الثانية حول التركيب العنصرى للمادة الحية هي عدم التأكد من العدد الدقيق للعناصر المطلوبة لها. فبعض العناصر مثل السيلينيوم والألمنيوم توجد بتركيزات ضئيلة جداً في الكائنات الحية. والسؤال إذن هو ماإذا كانت مثل تلك العناصر تلعب

دوراً أساسياً بالنسبة للحياة رغم ندرتها أم أنها إكتسبتها من الوسط المحيط بها بالصدفة في غذائها.

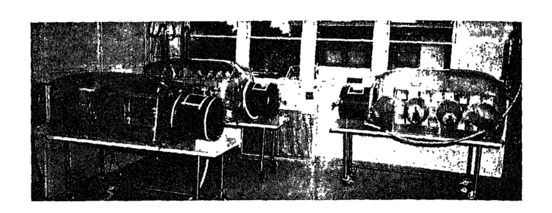
إحدى المحاولات التي تمت للاجابة على مثل تلك الأسئلة موضحة في الشكل (٣-٨). تربي فئران صغيرة في أوعية من البلاستيك لعزل العناصر الدقيقة ويتم ترشيح الغبار من الهواء الذي تتلقاه الحيوانات كما يتم إعداد غذائها بعناية فائقة بحيث تختزل منه العناصر الملوثة إلى أدنى درجه ممكنة. وبهذه الطريقة تمكن الدكتور كلاوس شوارتز ومعاونوه من إثبات أن الفئران لايمكن أن تنمو نمواً عادياً إلا إذا تلقت كميات ضئيلة من الفاناديوم والسيلينيوم والفلور في غذائها. وبالنسبة للعنصر الأخير فان ٥,٠ جزء من كل مليون جزء من الغذاء كانت كافية لصحة ونمو طبيعيين. وهناك مفارقة ودرس هام في هذا الاكتشاف. فبعض مركبات الفلور تستخدم كسم للفئران وعند التركيزات التي يبتلعها الفأر تؤدى عملها على خير وجه. هنا إذن عنصر الجرعات الكبيرة منه قاتلة بينما الجرعات الصغيرة منه لاغنى عنها مطلقاً للحياة.

٣-٣. الذرات ATOMS

كل عنصر يتكون من نوع واحد من الذرات. ويمكننا تعريف الذرة بأنها أصغر جزء من العنصر يمكنه الدخول في إتحاد مع عناصر أخرى. ولسهولة دراسة العناصر والذرات التي تتكون منها نعطى لكل عنصر رمز، ورموز العناصر مبينة في الشكل (٣-٩).

تركيب الذرة STRUCTURE OF THE ATOM

لم ير أحد الذرة مطلقاً ولكن سنوات من البحث أدت إلى نموذج يوضح الكثير من الخواص التي يمكن قياسها للعناصر. وكل ذرة تتكون من نواة صغيرة nucleus كثيفة تحمل شحنات موجبة ويحيط بها دقائق أخف وزناً وتحمل شحنات سالبة تعرف بالاليكترونات electrons. ونواة أبسط الذرات وهى ذرات الهيدروجين تتكون من دقيقة واحدة موجبة الشحنة تسمى بروتون proton ولأن بها بروتون واحد فإن ذرة الهيدروجين تُعطى العدد الذرى واحد. ويوجد مع هذا البروتون المنفرد إليكترون منفرد



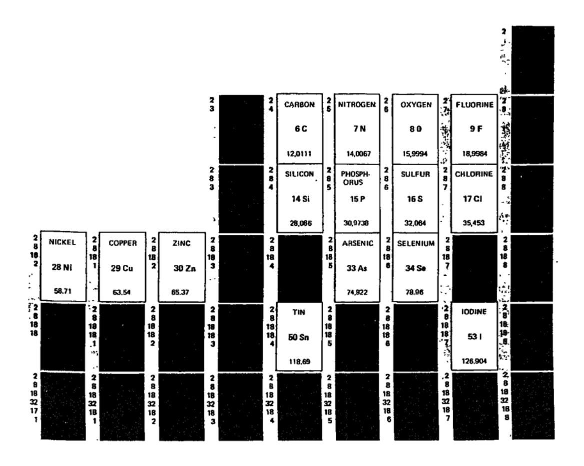
الشكل ٣-٨. أوعية عزل العناصر الدقيقة . في هذه الأوعية البلاستكية تعيش الحيوانات محمية تماما من أي عناصر ملوثة بينما تتلقى غذاء يتم تجهيزه بعناية وتركيبه محدد بدقة . بمثل هذا الجهاز تبين أن الفئران لا يمكن أن تنمو نموا طبيعيا بدون كميات قليلة من السيلينيوم والفاناديوم والفلور في غذائها . (بتصريح من كلاوس شوارتز - إدارة المستشفى البيطرى - لونج بيتش - كاليفورنيا) .

وتبلغ شحنة الاليكترون نفس مقدار شحنة البروتون وبذلك تكون الذرة متعادلة كهربيا . وكل وزن الذرة تقريبا يعود إلى وزن البروتون . وذرة عنصر الهيليوم (He) لها إثنان من البروتونات في نواتها . ولذلك فالعدد الذري لها هو ٢ (الشكل ٣-١٠) . ونواه الهيليوم تحتوي ايضا على دقيقتين تعرفان بالنيوترونات neutrons . والنيوترونات لها نفس وزن البروتونات ولكنها لاتحمل أى شحنات كهربية . وتتماسك البروتونات والنيوترونات مع بعضها بقوة لتكوين النواة الكثيفة ذات الشحنات في الذرة . وحول هذه النواة يوجد إثنان من الاليكترونات بحيث تكون الذرة - مرة أخرى - متعادلة في مجموعها .

ويتبع تركيب جميع الأنواع الأخرى من الذرات نفس الخطة . ويمكن وضع الذرات في ترتيب تصاعدى حسب الأعداد الذرية من الليثيوم (العدد الذرى = ٣) وحتى الهاهنيوم (العدد الذرى = ١٠٥) كما في الشكل (٣-٩) . ولا تظهر أي فراغات في هذه القائمة حيث أن لكل عنصر العدد الذرى الخاص به وحده وذراته فيها بروتون واحد وإليكترون واحد أكثر مما لذرات العنصر الذي يسبقه في القائمة .

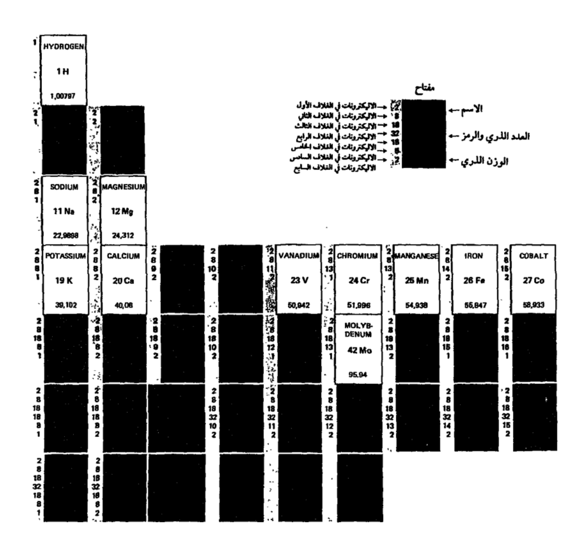
تحيط إليكترونات الذرة بالنواة . وفي أحد النماذج القديمة للتركيب الذرى كان يُظن أن الاليكترونات تتحرك حول النواة في مدارات orbits تماماً كما تتحرك الكواكب حول

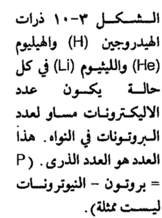
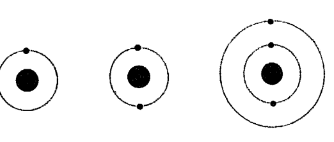
الشمس. ولكن هذا تبسيط أكثر من اللازم وإن كانت الاليكترونات بصفة عامة موجودة في مناطق محددة نسبياً حول النواة. فمثلا الاليكترونان في ذره الهيليوم محددان في منطقة كروية تحيط بالنواه وتسمى الغلاف K (أو مستوى الطاقة shell K- K) وفي الليثيوم (العدد الذري = ٣) يوجد ثلاثة إليكترونات إثنان منها في الغلاف K والثالث يوجد أبعد قليلا عن النواة في الغلاف L. وبسبب وجوده بعيدا عن الشحنة المغايرة (+) للنواة فإن هذا الاليكترون يكون أقل إستقراراً. وفي كل من العناصر التالية بحسب ترتيب أعدادها الذرية يضاف إليكترون واحد إلى الغلاف L (الشكل



الشكل ٣-٩. الجدول الدورى للعناصر. العناصر في كل عمود رأسى لها نفس عدد الاليكترونات في الغلاف الخارجي ولذلك تتشارك في خواصها الكيميائية. العناصر التي ثبت عدم جداوها بالنسبة للحياة موضحة بلون قاتم. العناصر ٥٧-٧١ و ٨٩-١٠٣ لا تلعب دورا في المادة الحية.

٣-١١) . ويستمر ذلك حتى تصل إلى عنصر النيون (العدد الذري = ١٠) وله ثمانية إليكترونات . وفي الصوديوم (العدد الذري = ١١) يوجد الاليكترون الحادى عشر في مستوى طاقة أعلى هو الغلاف M . ومن الصوديوم الى الأرجون يمتلىء هذا الغلاف تدريجياً بالاليكترونات حتى يبلغ الحد الأقصى وهو ثمانية . لاحظ أن الحد الأقصى لعدد الإليكترونات في الغلاف K هو إثنان بينما أعلى رقم يستوعبه أى غلاف آخر حينما يكون هو الغلاف الخارجي هو ثمانية . (هناك إستثناء واحد لايهمنا فهل يمكن أن تلاحظه) .



الشكل ٣-١٠ ذرات الهيدروجين (H) والهيليوم (He) والليثيوم (Li) في كل حالة يكون عدد الاليكترونات مساو لعدد البروتونات في النواه. هذا العدد هو العدد الذرى. (P = بروتون - النيوترونات ليست ممثلة).

الشكل ٣-١١ . التركيب الأليكتروني لذرات العناصر ١-٣٦. وتتحدد الخواص الكيميائية للعنصر بعدد الاليكترونات الموجودة في أقصى مستوى خارجي للطاقة (غلاف).

العدد الذرى	العنصر	مستويات الطاقة K	L	M	N
١	الهيدروجين	١			
٢	الهيليوم	٢			
٣	الليثيوم	٢	١		
٤	البيريلليوم	٢	٢		
٥	البورون	٢	٣		
٦	الكربون	٢	٤		
٧	النتروجين	٢	٥		
٨	الأوكسجين	٢	٦		
٩	الفلور	٢	٧		
١٠	النيون	٢	٨		
١١	الصوديوم	٢	٨	١	
١٢	المغنيسيوم	٢	٨	٢	
١٣	الألومنيوم	٢	٨	٣	
١٤	السيليكون	٢	٨	٤	

تابع الشكل ٣-١١.

العدد الذرى	العنصر	مستويات الطاقة K	L	M	N
١٥	الفوسفور	٢	٨	٥	
١٦	الكبريت	٢	٨	٦	
١٧	الكلـور	٢	٨	٧	
١٨	الأرجــون	٢	٨	٨	
١٩	البوتاسيوم	٢	٨	٨	١
٢٠	الكالسيوم	٢	٨	٨	٢
٢١	سكانديوم	٢	٨	٩	٢
٢٢	تيتانيوم	٢	٨	١٠	٢
٢٣	فاناديوم	٢	٨	١١	٢
٢٤	الكروم	٢	٨	١٣	١
٢٥	المنجنيز	٢	٨	١٣	٢
٢٦	الحديد	٢	٨	١٤	٢
٢٧	كوبالت	٢	٨	١٥	٢
٢٨	النيكل	٢	٨	١٦	٢
٢٩	النحاس	٢	٨	١٨	١
٣٠	الخارصين	٢	٨	١٨	٢
٣١	الجاليوم	٢	٨	١٨	٣
٣٢	الجرمانيوم	٢	٨	١٨	٤
٣٣	الزرنيخ	٢	٨	١٨	٥
٣٤	السيلينيوم	٢	٨	١٨	٦
٣٥	البروم	٢	٨	١٨	٧
٣٦	الكريبتون	٢	٨	١٨	٨

النظائر ISOTOPES

جميع الذرات لأى عنصر تحتوي على نفس عدد البروتونات في أنويتها. وهذا هو العدد الذرى لذلك العنصر. ولكن ذلك لا ينطبق على النيوترونات. فأنوية الذرات المختلفة لنفس العنصر قد تختلف في عدد النيوترونات. ولأن النيوترونات والبروتونات ثقيلة (ومتساوية) الوزن ولأن كل وزن الذره تقريبا يرجع الى وزن النواه فان مثل تلك الذرات تختلف في الوزن الذرى. وذرات نفس العنصر التي تختلف عن بعضها في الوزن الذرى تسمى بالنظائر.

الوزن الفعلى للذرة الواحدة متناهى فى الصغر . وقد إتفق على التعبير عن الوزن الذري بالقياس الى ذرة معينة هي النظير المشع لذرة الكربون الذي تحتوي نواته على ستة بروتونات. هذه الذرة يرمز لها بالرمز C^{12} ويعطي لذرة الكربون -١٢ (C^{12}) وزن ذرى تقريبي ١٢ دالتون (سميت هذه الوحدات باسم أحد رواد دراسة الوزن الذري جون دالتون). وعلى ذلك فإن الدالتون هو ١/١٢ من وزن ذرة الكربون (C^{12}) ولكل من البروتون والنيوترون وزن قريب من الدالتون والكربون - ١٢ هو أكثر نظائر الكربون شيوعاً بينما يوجد الكربون - ١٣ (C^{13}) وله ٦ بروتونات وسبعة نيوترونات والكربون - ١٤ (C^{14}) وله ستة بروتونات وثمانية نيوترونات بكميات أقل بكثير.

إذا نظرت إلى الجدول المبين في شكل (٣-٩) فقد تلاحظ أن معظم الأوزان الذرية ليست أرقام صحيحة وذلك لأن العينات الطبيعية من العناصر تتكون من خليط من النظائر . فمثلا في العينات الطبيعية من الكلور يكون ٧٥٪ من الذرات تقريبا النظير (Cl^{35}) بينما الباقي من (Cl^{37}) والمتوسط الوزني لهذه النسب هو ٣٥,٥ وهو ما يقارب القيمة المذكورة في الشكل (٣-٩).

وجود النظائر وطرق تحضير مخاليط غير طبيعية منها تمثل أداة قيمة للغاية بالنسبة لعلماء الأحياء. فمثلا يمكن تحضير مركب كربوني تستغله الكائنات الحية وتحل فيه ذرات كربون - ١٤ (C^{14}) محل معظم ذرات الكربون - ١٢ (C^{12}) ولكن الكربون - ١٤ مشع وعند تتبع الاشعاع في كائن حي يمكن معرفة مصير هذا المركب الكربون في ذلك الكائن. وسوف ندرس عدة أمثلة محددة لهذه الطريقة في أبواب لاحقة. أما النقطة التي يجب مراعاتها الآن فهي أن وزن الذرة ذو تأثير طفيف أو بدون تأثير على

الخواص الكيميائية للذرة. فكيمياء العنصر والذرات التي يتكون منها (مهما كان وزنها الذرى) هي دالة العدد الذرى للعنصر. فطالما كان للذرة ستة بروتونات وثمانية نيوترونات تعطينا أحد نظائر الكربون وهو (C^{14}) ولكن سبعه بروتونات وسبعه نيوترونات تعطينا عنصر مختلف تماما وهو النتروجين - ١٤ . دعونا الآن نعرف لماذا كان ذلك.

الجدول الدورى: نظره عن قرب THE PERIODIC TABLE : A CLOSER LOOK

تترتب العناصر في الشكل (٣-٩) بحسب العدد الذرى. ولكن لهذا الرتيب مدلولات أكثر بكثير من مدلولاته كمجرد عمود بسيط. فعند ترتيب العناصر بالطريقة المبينة تظهر خاصية هامة لهذه القائمة وهي ظهور عناصر تشترك فيما بينها في الكثير من الخواص الكيميائية على فترات منتظمة.

في العمود قبل الأخير من اليمين نجد قائمة تضم الفلور والكلور والبروم واليود. هذه العناصر متشابهة إلى حد كبير في خواصها الكيميائية فمثلا عندما تذوب في الماء فإنها جميعاً تعطى محاليل قاتلة للجراثيم. وفي العمود الثاني من اليسار نجد الكالسيوم (عدد ذرى = ٢٠) وسترونشيوم (عدد ذرى = ٣٨). ومن المشاكل المثيرة للقلق والناجمة عن اختبار الأسلحة الذرية في الغلاف الجوي هي إنتاج سترونشيوم ـ ٩٠ (Sr^{90}) ، وهو نظير مشع تراكم في عظام الأطفال لأن أجسامهم خلطت بينه وبين الكالسيوم (أحد المكونات الرئيسية للعظام).

ماهي السمة المشتركة بين كل العناصر في كل عمود رأسي طويل؟ العناصر الموجودة في كل عمود رأسي طويل لا تتشابه في الصفات الكيميائية وحسب ولكن لها نفس عدد الاليكترونات في الغلاف الخارجي. والعناصر الموجودة في يسار الجدول ولها إليكترون واحد أو إثنان أو ثلاثة في أغفلتها الخارجية هي الفلزات. أما العناصر في أعلى يمين الجدول ولها أربعة أو خمسة أو ستة أو سبعة إلكيترونات في أغفلتها الخارجية فهي اللافلزات. وتلك العناصر التي لها ثمانية إليكترونات في أغفلتها الخارجية (النيون والارجون . . . . الخ) تشترك جميعاً في خاصية هامة ألا وهي أنها تقريباً خاملة بالكامل أي أنه لاخواص كيميائية لها بالمعنى المتعارف عليه ، أو بعبارة أخرى فهي تفشل تحت

الظروف العادية في التفاعل مع أي نوع أخر من الذرات. وعلى ذلك فإن عدد وترتيب الاليكترونات في ذرات العنصر هما اللذان يحددان خواص هذا العنصر.

باستثناء مايسمى بالغازات الخاملة فإن العناصر تتفاعل مع بعضها. فاذا فحصنا النسبة التي تتفاعل بها الأنواع المختلفة من الذرات فإننا سنكتشف مفتاحاً هاماً يحدد خواصها الكيميائية.

فمثلا إذا سمحنا لذرات الهيدروجين بالتفاعل مع ذرات الكلور (وهما يتفاعلان بعنف) فإننا نجد أنهما يتحدان بنسبة ١ : ١ والناتج من هذا التفاعل هو مركب : كلوريد الهيدروجين. ونحن نعطى هذا المركب الرمز HCl. وذرات الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم وبقية الذرات في هذا العمود كل منها يتفاعل مع الكلور بنسبة ١ : ١ وبذلك تتكون المركبات NaCl, LiCl (ملح الطعام)، KCl.

وإذا كررنا نفس العملية مع العناصر الموجودة في العمود التالي فإننا نجد أن النسبة الآن أصبحت ١ : ٢ أي أن المركبات الناتجة توصف بالرموز $BeCl_2$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, الخ ومع عناصر العمود الذي يليه تكون النواتج $AlCl_3$, BCl_3. إلخ، مع الكربون وهو أخف العناصر في العمود التالي وله أهمية ضخمة بالنسبة لنا فإن المركب الذي يتكون من التفاعل مع الكلور هو CCl_4، إذا تقدمنا إلى العمود التالي نجد أن ذرات النتروجين والهيدروجين تتفاعل بنسبة ١ : ٣ لتكون المركب NH_3 (الأمونيا أو النوشادر). ومع الاستمرار في هذا الاتجاه نجد أن الأوكسجين والهيدرجين يتفاعلان لتكوين الماء (H_2O) والكبريت يوجد أسفل الأوكسجين مباشرة في نفس العمود ويتبع نفس النسبة لتكوين (H_2S) . والفلور تماما مثل الكلور وبقية العناصر في نفس العمود يتفاعل مع ذرات الهيدروجين بنسبة ١ : ١ أما العناصر الموجودة في العمود الأخير فإنها لا تتفاعل بالمرة.

في كل هذه الحالات تفاعلت الذرات بحيث كان العدد الاجمالي للاليكترونات الخارجية التي ساهمت بها كل منها ثمانية. فاذا تذكرنا الثبات الكيميائي الكبير لتلك العناصر التي يوجد بها ثمانية إليكترونات في الأغلفة الخارجية (إثنان في حالة الهيليوم) فإننا نستنتج أن ذرات العناصر تتفاعل مع بعضها بحيث يأخذ كل من المشاركين في التفاعل تنظيماً إليكترونياً مشابهاً لذلك الموجود في الغازات الخاملة.

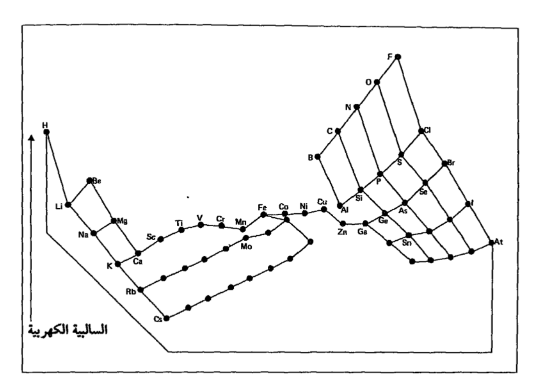
وكما سنرى فإنه يمكن التوصل إلى هذا التنظيم عن طريق إكتساب مزيد من الاليكترونات أو فقد إليكترونات أو المشاركة في بعض الاليكترونات. وعدد الاليكترونات التي لابد للذرة أن تكتسبها أو تفقدها أو تشارك بها لتصل الى تنظيم ثابت من ثمانية إليكترونات (إثنان بالنسبة للهيدروجين) يسمى التكافؤ valence . والآن علينا أن نتساءل أي من هذه الطرق الثلاثة المحتملة تختارها الذرة للتعبير عن تكافؤها. تعتمد الاجابة على السالبية الكهربية electronegativity للذرة.

٣-٤ الروابط الكيميائية CHEMICAL BONDS

تختلف العناصر من حيث قابلية الذرات لمزيد من الاليكترونات. فكلما زادت هذه القابلية زادت السالبية الكهربية للذرة. فاذا غيرنا من ترتيب الجدول الدورى بحيث كلما زادت السالبية الكهربية كلما إرتفع مكان العنصر في الجدول (الشكل ٣ - ١٢) فاننا نخرج بملاحظتين.
أولاً : كلما نقص العدد الذري لعنصر في عمود ماكلما زادت السالبية الكهربية لذراته. ويبدو ذلك منطقيا إذا ماتذكرت أن كل غلاف أو مستوى طاقة إضافي يكون أكثر بعداً عن جذب البروتونات ذات الشحنات الموجبه الموجودة في النواة. ثانياً : أن تلك العناصر (اللافلزات) التي تحتاج فقط إلى إليكترون واحد أو إثنين لملء الغلاف الخارجي تكون ذات سالبية كهربية أكبر من العناصر (الفلزات) التي تحتاج لاكتساب ست أو سبع إليكترونات لملء الغلاف. والفلزات بدلاً من ذلك تكون على إستعداد للتخلص من الاليكترون أو الاليكترونين اللذين يشغلان الغلاف الخارجي. والسالبية الكهربية النسبية لذرتين متفاعلتين تحدد نوع الرابطة الكيميائية التي تنشأ بينهما.

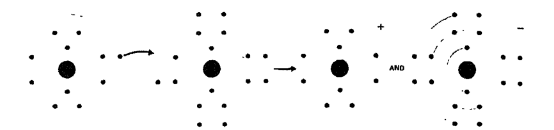
الحاله الأولى : الروابط الأيونية THE FIRST CASE : IONIC BONDS

الفلور هو أكثر العناصر سالبية كهربية بينما للصوديوم سالبيه كهربية ضعيفة وعندما يلتقيان فإن القابلية الإليكترونية للفلور تكون من القوة بحيث تنتزع الاليكترون الوحيد الموجود في الغلاف الخارجي لذرة الصوديوم. والصوديوم مثلة مثل كل الفلزات ليست له قابلية إليكترونية قوية ولذا فإنه يفرط بسهولة في اليكترونه الخارجي. والآن وقد فقد



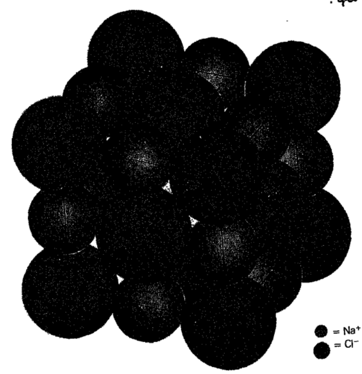
الشكل ٣-١٢ . السالبية الكهربية النسبية. جزء من الجدول الدورى يبين السالبية الكهربية النسبية لبعض العناصر . على الرغم من أن للفلور أعلى سالبية كهربية فان السالبية الكهربية للعنصر الذي يليه مباشرة وهو الاكسجين هي التي تستغل من قبل الكائنات الحية.

إليكترون فإنه يحتوي على شحنة موجبة واحدة (١١ بروتون وعشرة إليكترونات فقط). وبالمثل ذرة الفلور قد إكتسبت شحنة سالبة واحدة بسبب الاليكترون الاضافي (٩ بروتونات وعشرة إليكترونات). وهذه الذرات ذوات الشحنات الكهربية تسمى أيونات ions . والتجاذب المتبادل بين الشحنات الكهربية المخالفة يعمل على تماسك الأيونات بواسطة روابط أيونية ionic bonds . وبالمثل يؤدي التفاعل بين الصوديوم والكلور إلى تكوين أيونات الصوديوم و أيونات الكلور (الشكل ٣ - ١٣). وفي كل من هاتين الحالتين تكون النسبة بين الأيونات ١ : ١ . وعلى الرغم من ذلك لاتتماسك الأيونات مع بعضها في أزواج ولكنها تتراص في نظم ثلاثية الأبعاد (الشكل ٣ - ١٤). وكل أيون صوديوم يكون ممسوكاً بواسطة ستة أيونات كلور (من أعلى و أسفل وأمام وخلف وعن يمين ويسار) بينما يكون كل أيون كلوريد بدوره ممسوكا بواسطة ستة أيونات صوديوم وتكون المحصلة أن الأيونات تتراص في بللورة مكعبة لملح الطعام.

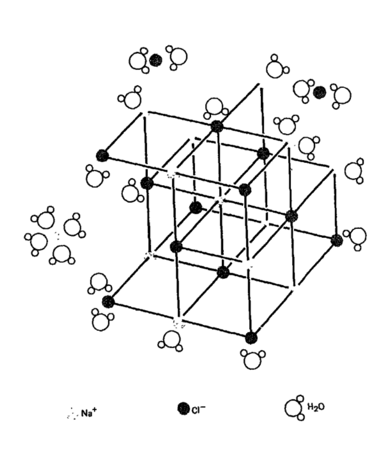


الشكل ٣-١٣ . تكوين كلوريد الصوديوم. في نقل إليكترون من ذرة الصوديوم إلى ذرة الكلور ، كل ذرة تكتسب غلاف خارجي من ثمانية إليكترونات وتستقر. وتتطلب كل ذرة شحنة كهربية. الذرات ذات الشحنات تسمى أيونات.

تنتشر المركبات الأيونية بكثرة في الطبيعة. ومع أننا عادة مانربط بينها وبين عالم الجمادات من صخور ومعادن فان الكثير منها أساسى للحياة. فأملاح الصوديوم والبوتاسيوم والكلسيوم والكلور وغيرها من العناصر توجد ذائبة في سائل الدم وسوائل الخلايا وما إلى ذلك . وفي هذه الحالة تنفصل الأيونات الموجبة عن الأيونات السالبة (الشكل ٣-١٥). ولا تزال أيونات الصوديوم (Na^+) وأيونات الكلوريد (Cl^-) الذائبة محتفظة بخواص ملح الطعام ولا تسترد الخواص السامة للذرات المتعادلة التي نشأت منها.



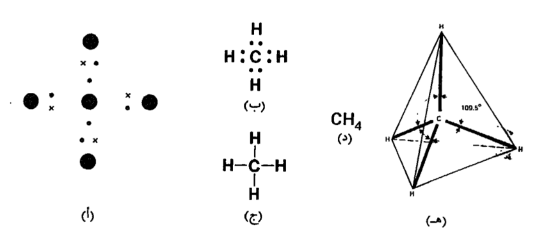
الشكل ٣-١٤. التركيب البللورى لبللورة كلوريد الصوديوم (NaCl) التراص المنتظم لأيونات الصوديوم Na^+ والكلور Cl^- ينتج بللورة على شكل مكعب.



الشكل ٣-١٥. ذوبان التركيب البللورى لكلوريد الصوديوم NaCl على الرغم من أن جزىء الماء ككل متعادل كهربيا إلا أن التوزيع غير المنتظم للاليكترونات فيه يجعله قطبيا بعض الشىء أي ذى شحنة سالبة حول ذرة الأكسجين وشحنة موجبة حول ذرتي الهيدروجين. وبسبب هذه القطبية يكون الماء مذيباً ممتازا للمواد الايونية. تنجذب أيونات Cl نحو منطقة الشحنة الموجبة من جزىء الماء بينما تنجذب أيونات Na^+ نحو منطقة الشحنة السالبة وتكون النتيجة تفكك الأيونات وذوبان البللورة.

الحالة الثانية : الرابطة التساهمية THE SECOND CASE : THE COVALENT BOND

ذرات الكربون والهيدروجين لها سالبية كهربية متشابهة (الشكل ٣ - ١٢)، وحينما تلتقى فإن السبيل الوحيد أمام كل منهما للتوصل إلى ترتيب إليكتروني مستقر هو أن تحدث مشاركة بينهما في أزواج من الاليكترونات. فكل من الاليكترونات الأربعة في الغلاف L لذرة الكربون يتوحد مع الاليكترون المنفرد الذي تساهم به ذرة الهيدروجين. وبهذه الطريقة يتكون جزىء الميثان (الشكل ٣ - ١٦). وكل زوج من الاليكترونات التي ساهمت بها الذرات يكون رابطة تساهمية ويمكننا توضيح ذلك كما هو مبين في الشكل (٣ - ١٦ - أ) حيث تمثل علامات X الاليكترونات التي ساهمت بها ذرات الهيدروجين بينما تمثل النقاط الاليكترونات الخارجية في الغلاف L لذرة الكربون. وجميع الاليكترونات متشابهة ولذا فان تمثيلهم جميعا بنقاط لايكون مضللا



الشكل ٣-١٦. خمس طرق لرسم جزىء الميثان. (أ) التركيب الذرى الكامل. (ب) الصيغة الاليكترونية النقطية (ج) الصيغة التركيبية. (د) الصيغة الجزيئية. (هـ) تمثيل ثلاثي الأبعاد يبين إتجاه الروابط التساهمية الأربعة نحو اركان هرم رباعي. المناطق الملونة تمثل المداريات التي يوجد في كل منها زوج من الاليكترونات المقتسمة.

(الشكل ٣ - ١٦ - ب). ولأن هذه الصيغ الاليكترونية - النقطية ليست سهلة فإننا نضع مكان كل زوج من الاليكترونات خط وهذا يعطينا الصيغة التركيبة structural for-mula للجـزىء (الشكل ٣ - ١٦ - ج) فاذا كانت هذه غير مريحة أو (كما في حالة الجزيئات الأكثر تعقيداً) يمكن أن نستخدم ما يسمى بالصيغة الجزيئية مثل CH_4 وهذه تدلنا فقط على عدد الذرات الموجودة من كل نوع في الجزىء.

على الـرغم من أن هؤلاء الـذين يمضـون معـظم وقتهم مع صفحـات الكتب والسبورات ذات البعدين قد يغفلون هذه الحقيقة إلا أن الذرات والجزيئات توجد في الـواقع على صورة ثلاثية الأبعاد ولذلك فحتى الصيغة التي تمثل فيها الاليكترونات بنقاط للميثان تكون مضللة. وفي الواقع فإن الروابط التساهمية الأربعة التي تنشأ بين ذرات الهيدروجين وذرة الكربون تكون أبعد مايمكن عن بعضها. وذلك يعني أن كلا منها تكون متجهة نحو أحد أركان شكل هرمي رباعي منتظم (الشكل ٣ - ١٦ - د) أي أن كلا من الروابط التساهمية الأربعة تكون زاوية مقدارها ١٠٩,٥° مع كل واحدة من الـروابط الثـلاث المجـاورة وتكـون النتيجـة هي توزيع تام الإنتـظام لجميع الاليكترونات (والأنوية) التي يشتمل عليها هذا الجزىء.

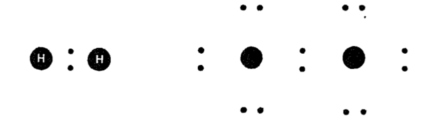
هنـاك مثـالان لهما أهمية خاصة للروابط التساهمية التي تنشأ بين ذرات لها سالبية كهربية متشابهة. فالعديد من العناصر الغازية لاتوجد في صورة ذرات منفردة ولكن على هيئة جزيئات من ذرتين وليس هناك إختلاف في السالبية الكهربية بين ذرتين متماثلتين ولـذلك تكون الروابط بينهما تساهمية. النيتروجين والأكسجين يشكلان معاً أكثر من ٩٩٪ من الغلاف الجوى و يوجد ان على هيئة جزيئات ثنائية الذرات ولهما الصيغتان O_2 ، N_2 على التوالي. والكلور وغاز الهيدروجين أيضا موجودان على هيئة جزيئات ثنائية الذرات H_2 ، Cl_2 (الشكل ٣ – ١٧).

ذرات الكربون هي العمود الفقري للمادة الحية وسنري في الباب التالي عدة امثلة لجزيئـات عملاقة لا يمكن أن توجد الحياة كما نعرفها بدونها وجميع هذه الجزئيات العملاقة تعتمد في حجمها على قابلية ذرات الكربون لتكوين روابط فيما بينها. وحيث أنه لايوجد فرق في السـالبية الكهـربية فإن هذه الـروابط تكون تساهمية ويمكن بذلك تكوين سلاسل من ذرات الكربون. وهذه تشكل الأساس التركيبي لجميع الجزيئات تقريبا التي تنفرد بها المادة الحية.

الحالة الثالثة : الرابطة التساهمية القطبية

THE THIRD CASE : THE POLAR COVALENT BOND

الأكسجين له ثاني أعلى سالبية كهربية بين كل العناصر (الشكل ٣ – ١٢). أما السـالبية الكهـربية للهيدروجـين فهى معتـدلـة وهي ليست مثـل ما للأكسجين أو النتروجين ولكنها أعلى مما للصوديوم أو الكالسيوم. فماذا يحدث عندما يلتقى الهيدروجين بالأكسجين ؟ الفرق في السالبية الكهربية لهما ليس كافياً لتكوين أيونات وبالتالي فإن عليهما أن يقتسما زوجاً من الأليكترونات أي تتكون بينهما رابطة تساهمية. ومع ذلك فان الإقتسام لايكون متساوياً في جميع الأحوال، في حالتنا هذه تعمل السالبية الكهربية الأعلى لذرات الأوكسجين على سحب أزواج الاليكترونات بالقرب من نواتها وبالتالي بعيداً عن أنوية ذرات الهيدروجين. ويترتب على ذلك تركيز الشحنات السالبة بالقرب من ذرة الأكسجين وبعيداً عن الشحنات الموجبة للبروتونات المكونة لأنوية الهيدروجين. ولـذلـك فان الـرابطة التي تنشأ بينها تكون ذات طبيعة متوسطة بين الرابطة الأيونية



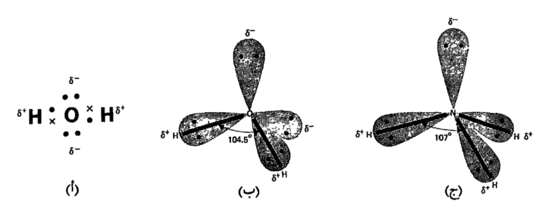
الشكل ٣-١٧ . تركيب جزيئات الهيدروجين والكلور. الرابطة بين ذرتي كل من هذين الجزيئين ثنائي الذرات رابطة تساهمية .

والرابطة التساهمية . هناك فصل بين الشحنات ولكنه غير تام كما يحدث عند تكوين أيونات ونـرمـز للشحنـات الجزئيـة الناتجـة بالرمـز S (الشكل ٣ - ١٨) .

إذا كان ترتيب ذرتى الهيدروجـين حول ذرة الأوكسجين كما هو موضح في شكل ٣-١٨-أ وفي نفس المستـوي لكـان لهذه الروابط القطبية أهمية قليلة . ولكن عندما نتفحص الموقف كما يوجد فعلا في ثلاثة أبعاد نجد أن توزيع الشحنات الجزئية حول جزىء المـاء غير متمـاثل . فالأزواج الأربعـة مـن الاليكتـرونات التـي تحيـط بـذرة الأوكسجين في جزىء ماء تكون محصورة فـي ٤ مناطق تشبـة وحدة رفع الأثقال dumbbell فـي الغـلاف L . هـذه المناطـق (وهـي تسمـى مداريات orbitals) تتجه نحو الأركان الأربعة لشكل هرمي منتظم . وعلى ذلك يكون لها ترتيب مشابة لما وجدناه في الميثان (شكل ٣ - ١٦) .

زوجـان من الاليكـترونـات يمثلان روابط تساهمية قطبية مع أنويـة الهيـدروجين ويبقـى زوجان غير مقتسمين unshared. وبسبب الشكل الهندسي للهرم المنتظم فأنه مهما كان الركنان اللذين نختارهما لوضع أنويه الهيدروجين فسوف يؤدي إلى توزيع غير متـمـاثـل للشحنـات الجزئية . أحد جوانب الجزىء (حيث توجد ذرات الهيدروجين) سيحمـل شحنات جزئية موجبة بينما الجانب الآخر (حيث أزواج الاليكترونات غير المقتسمة) سيحمل شحنات جزئية سالبة . ولذلك فان الجزىء ككل يكون قطبياً .

القياسـات الحقيقية للزاوية المحصـورة بين الـرابطتين القطبيتين في الماء توضح أنهما متبـاعـدتـان بمقـدار ١٠٤,٥° (الشكـل ٣-١٨-ب) وهي أقـل قليلاً من الزاوية



الشكل ٣-١٨ . (أ) تمثيل جزىء الماء في بعدين والرمز δ^+ يمثل شحنة كهربية جزئية وبهذا الاسلوب في الرسم يكون توزيع الشحنات الجزئية منتظما.
(ب) تمثيل ثلاثى الابعاد لجزىء الماء. لاحظ أن الشحنات الجزئية الموجبة تقع عند ركنى هرم رباعي بينما الشحنات الجزئية السالبة عند الركنين الآخرين ويكون الجزىء ككل قطبي. المساحات الملونة هي المداريات التي تتحدد فيها أزواج الاليكترونات المقتسمة وغير المقتسمة. (ج) التركيب الفراغي لجزىء الأمونيا والأمونيا مثل الماء قطبية قوية.

١٠٩,٥° التي كنا نتوقعها لو أن نواتي الهيدروجين كانتا أبعد ما يمكن عن بعضهما. وقد يبين ذلك أن أزواج الاليكترونات غير المقتسمة تشغل حيزاً أكبر مما تشغلة الأزواج المقتسمة وبذلك تدفع ذرتي الهيدروجين إلى التقارب من بعضها. كما أنه يفسر أيضا لماذا تكون الزاوية بين الروابط التساهمية القطبية الثلاث في جزىء الأمونيا ١٠٧° (بدلا من زاوية الشكل الهرمي المنتظم ومقدارها ١٠٩,٥°) كما في الشكل (٣-١٨ ج). وفي هذه الحالة ايضا فان الجزىء ككل يكون قطبيا مع تركيز من السالبية في أحد اركان الشكل الهرمي وتركيز الموجبية في بقية الاركان.

٣-٥ . الرابطة الهيدروجينية THE HYDROGEN BOND

إن القطبية في جزىء الماء تجعل التجاذب بين جزيئات الماء ممكناً فلكل جزىء منطقة δ^+ و منطقة δ^- وبسبب التجاذب بين الشحنات غير المتشابهة فإن جزيئات الماء تميل إلى ترتيب نفسها بحيث تتقارب مناطق δ^+ مع مناطق δ^-. هذا يعني أن كل جزىء ماء يجذب إليه أربعة جزيئات حيث تكون كل ذرة هيدروجين في تجاذب مع

ذرة أوكسجين من جزىء قريب. ويمكن لكل ذرة أوكسجين من خلال ما لديها من زوجين غير مقتسمين من الاليكترونات أن تتجمع مع ذرتي هيدروجين من جزيئي ماء قريبين منها (الشكل ٣-١٩). وعلى حين تكون قوة التجاذب بين هذه الجزيئات القطبية ليست بمثل قوة الرابطة التساهمية أو الرابطة الأيونية إلا أنه لايمكن إغفالها وهي من الأهمية بحيث تستحق إسماً خاصاً بها : الرابطة الهيدروجينية. ويفسر الترابط الهيدروجيني بين جزيئات الماء بعضاً من الخواص الفريدة والحيوية للماء - هذه الخواص التي تجعل من وجود الماء مرادفاً للحياة ذاتها.

قابلية الماء للبقاء سائلا في جزء كبير من المدى الحرارى الموجود على الأرض هي إحدى هذه الخواص. فالجزيئات التي لها ما للماء من حجم صغير ولا تكون روابط هيدروجينية (مثل CO_2) تتحول من سائل إلى غاز. والترابط الهيدروجيني يفسر كذلك الكم الهائل من الطاقة (الحرارة) المطلوبة لتحويل الماء السائل (حيث الجزيئات بينها تجاذب بواسطة الروابط الهيدروجينية) إلى بخار ماء (حيث لايوجد هذا التجاذب). ولذلك فان الماء عامل هام في الاستقرار الحرارى وهذا يفسر إعتدال الجو بالقرب من المساحات المائية الكبيرة مثل المحيطات. ويستغل الكثير من الكائنات الحية هذه الخاصية حيث يكون إفراز وتبخير العرق وسيلة هامة لتبريد الجسم عند الكثير من الثدييات ويعتمد في كفاءته على الكميات الكبيرة من الحرارة المطلوبة لكسر الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء.

الشكل ٣-١٩. تكوين الروابط الهيدروجينية في الماء. كل جزىء ماء يرتبط بروابط هيدروجينية مع أربعة جزيئات أخرى موجودة عند أركان هرم رباعي منتظم. الروابط الهيدروجينية القوية في الماء تفسر الكثير من خواص هذه المادة.

٣-٦ . المواد المحبة للماء والمواد الكارهة للماء
WATER LOVERS AND WATER HATERS

النتروجين والهيدروجين مختلفان في السالبية الكهربية ولذلك فهما يتحدان بروابط تساهمية قطبية وكما في حالة الماء فان هندسة الجزىء ككل تكون قطبية وتكون δ^+ متجهة نحو ثلاث من قمم الهرم الرباعي بينما تكون δ^- تتجه نحو القمة الرابعة (الشكل ٣ - ١٨). وكما في حالة الماء أيضاً هناك فرصة لتكوين روابط هيدروجينية بين جزيئات الأمونيا. ولكن إذا تمكنت الجزيئات القطبية من التجاذب مع بعضها فلماذا لايحدث ذلك بين الجزيئات القطبية غير المتماثلة ؟ في الواقع فان هذا التجاذب يحدث. فاذا تركت غاز الأمونيا يمر خلال الماء فان الأمونيا تذوب بسهولة في الماء وتنتج الأمونيا المنزلية. وعموماً فان الجزيئات التي تتجاذب مع الماء تسمى محبة للماء hydrophilic. مثل هذا الجزىء يختلط (أي يذوب) في الماء بسهولة. أما إذا تركت الميثان يمر خلال الماء فان القليل منه يذوب في الماء وذلك بسبب أن الميثان لاقطبى apolar وكما لاحظنا من قبل فانه لاتوجد روابط تساهمية قطبية ولا شحنات δ. أي لا يوجد ما يجذب جزيئات الميثان الى جزيئات الماء. ولذلك يسمى الميثان كاره للماء - hydrophobic.

الجزيئات القطبية لاتجذب بعضها البعض فقط وإنما تجذب الأيونات أيضاً. وهذا يفسر سهولة ذوبان مثل تلك المواد ككلوريد الصوديوم في الماء. الشكل (٣ - ١٥) يعطى فكرة تخطيطية عن ذوبان بللورة من ملح الطعام حيث تتجاذب أيونات Cl^-, Na^+ مع أجزاء δ^- و δ^+ من جزيئات الماء على التوالي.

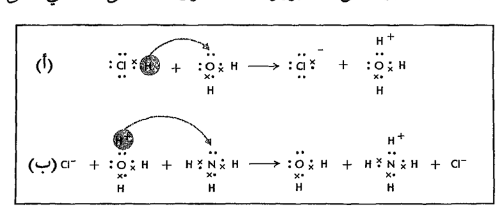
٣-٧ الأحماض والقواعد ACIDS AND BASES

تصور ما يحدث عندما تدع كلوريد الهيدروجين (وهو غاز - HCl) يمر خلال الماء. الكلور له سالبيه كهربية أعلى مما للهيدروجين ولذلك تكون الرابطة الوحيدة بينهما قطبية وكما رأينا تتجاذب الجزيئات القطبية مع بعضها ولذلك نتوقع أن يذوب HCl بسهوله في الماء. وهو بالفعل كذلك ولكن هذه ليست نهاية القصة. فالكلور يمارس تحكم كبير على زوج الاليكترونات المتقاسم مع الهيدروجين (أي أن الترابط القطبي قوى) بحيث

يكون البروتون الوحيد محروم تماما . ويترتب على ذلك أن ينجذب بسهوله إلى أي زوج اليكترونات غير متقاسمة موجودة على أي جزيئات قريبة . وجزيئات الماء لديها مثل هذا الزوج من الاليكترونات غير المتقاسمة ولذلك يغادر البروتون ذرة الكلور وينتقل إلى أحد أزواج الاليكترونات غير المتقاسمة على جزىء ماء (الشكل ٣-٢٠-أ) . ولكن لاحظ أن نواه الهيدروجين (البروتون) قد تركت إليكترونها ولذلك فان ما بدأ كجزىء واحد قد صار أيونات : أيون هيدروجين (H^+) وأيون كلوريد (Cl^-) وعلى ذلك تكون الخواص القطبية للماء قد جعلت جزيئات HCl تتأين . لايوجد أيون الهيدروجين منفرداً ولكنه يشغل أحد أزواج الاليكترونات غير المقتسمة على جزىء الماء لتكوين أيون الهيدرونيوم (H_3O^+) والمحلول الناتج خليط من أيونات H_3O^+ ، Cl^-) يسمى حامض الهيدروكلوريك .

والآن دعنا نمرر مادة قطبية أخرى NH_3 خلال محلول حامض الهيدروكلوريك . جزيئات الأمونيا لديها زوج واحد من الاليكترونات غير المتقاسمة وهذان لهما قابلية لبروتون أكبر مما لزوج الاليكترونات غير المتقاسمة لجزىء الماء . ويترتب على ذلك أن البروتون ينتقل مرة أخرى لتكوين أيون جديد هو أيون الأمونيوم (NH_4^+) والماء (الشكل ٣-٢٠-ب) .

بصفة عامة حينما تعطى المادة بروتونات لمادة أخرى فاننا نسمى المادة التي تعطى



الشكل ٣-٢٠ . (أ) تكوين حامض الهيدروكلوريك . كل مادة تطلق بروتونات تكون حامض. (ب) التفاعل بين حامض الهيدروكلوريك والأمونيا . جزىء الأمونيا يعمل كقاعدة تستقبل بروتون من أيون الهيدروجين . التفاعل بين حامض وقاعدة يسمى التعادل .

بروتون حامض acid وفي الامثلة السابقة يكون جزيء HCl وأيـون الهيدرونيـوم (H_3O^+) أحماض. أي مادة تستقبل بروتونات تسمى قاعدة base جزيء الماء في المثال الأول والأمـونيا فـي المثـال الثاني أدت دورها كقواعد. بينما HCl يوجد في الأنظمة الحية (مثل العصارة المعدية في المعدة) فان أكثر الأحماض إنتشاراً هي تلك التي تحتوي على مجموعة الكربوكسيل.

$$-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-O{:}H$$

ويسهل نزع نواه الهيدروجين (البروتون) من مجموعة الكربوكسيل لتكوين أيون الكربوكسيل.

$$-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-O{:}^-$$

حامض الخليك (CH_3COOH) مثال شائع لحامض كربوكسيلي. فاذا وضع في الماء فان البروتونات الموجودة على مجموعة COOH ــ سوف تنجذب إلى أزواج الاليكترونات غير المقسمة على جزئيات الماء وتنتج أيونات الهيدرونيوم (H_3O^+) وأيونـات الخـلات (CH_3COO^-) والخل هو محلول مخفف لحامض الخليك.

الأمـونيا كذلـك توجـد في الأنـظمة الحية ولكن أوسع القواعد انتشاراً هي تلك الجزيئـات التـي تشتمـل على مجموعة الأمينو amino group.

$$-\underset{\underset{\displaystyle H}{\cdot\cdot}}{\overset{\displaystyle H}{\ddot{N}}}{:}$$

يعمـل زوج الاليكترونات غير المقتسمة على إستقبال بروتون تماما كما يفعل في حالة جزيء الأمونيا. وكذلك تعمل أيونات البيكربونات كقواعد هامة في الأنسجة الحية.

$$O{=}\overset{\overset{\displaystyle OH}{|}}{C}-O{:}$$

الوزن الجزيئي والمول MOLECULAR WEIGHT AND THE MOLE

وزن الجزيء هو ببساطة مجموع أوزان كل الذرات التي يتكون منها هذا الجزيء ووحـدة الـوزن هي أيضاً الدالتون (١/١٢ من وزن ذرة الكربون - ١٢). الوزن الجزيئي (MW) للماء هو ١٨ دالتون (سوف نغفل الخطأ الطفيف الناجم عن وجود آثار من O^{17}, O^{18}, H^2 بين الغالبية من ذرات H^1, O^{16}).

لماذا كان من الأهمية أن نعرف الوزن الجزيئي لمركب ؟ لتوضيح ذلك دعنا نفترض أنـك ترغب في دراسـة إستجابة نحل العسل لمحاليل أنواع مختلفة من السكريات.

إحدى الطرق لعمل ذلك هي تحضير عدة محاليل مختلفة لترى أيها يفضلها النحل . وقد تقـدم للنحل خياراً بين محلول تركيزة ٣٥٪ من السكروز (السكر العادى) ومحلول تركيزة ٣٥٪ من الجلوكوز (أحد المكونات الطبيعية للعسل) . يتطلب ذلك إذ ابه ٣٥٠ جزء بالوزن (جرام مثلا) من السكر في كل حالة في ٦٥٠ جزء (جم) من الماء وبذلك تنتج ١٠٠٠ جم من كل محلول . ولكن هناك مشكلة في هذه الطريقة . فإستعداد نحل العسل للاستجابة لوجود السكر مذاباً في الماء تعتمد على عدد جزيئات السكر في حجم معين من المحلـول . ثـم إن وزن جـزيء السكـروز MW = 342 يقارب ضعفي وزن جزيء الجلوكوز (MW = 180) . وعلى ذلك فان محلول الجلوكوز ٣٥٪ سوف يحتوي على ما يقارب ضعفي عدد الجزيئات التي يحتوي عليها محلول السكروز ٣٥٪ . ولحل هذه المشكلة ينبغي عليك أن تحضر المحاليل بحيث يكون وزن السكروز و وزن الجلوكوز بنسبة ٣٤٢ : ١٨٠ وحينئذ يكون لديك نفس تركيز الجزيئات في كل منهما أي أن كل محلول سوف يحتوي على نفس العدد من الجزيئات .

عندما تزن ٣٤٢ جراماً بالضبط من السكروز تكون قد وزنت واحد مول منه . أي أن المـول هو كمية المادة التي يكون وزنها بالجرام مساو عددياً للوزن الجزيئي لتلك المادة . وبذلك يكون المول من الجلوكوز هو ١٨٠ جم . أكثر من ذلك عندما تذيب مولاً واحداً من مادة في كمية من الماء لتبلغ لتر واحد فانك تكون قد حضرت محلول ١ –مولار (1 M) هناك مخبار مدرج خصيصاً لذلك مبين في الشكل (٣–٢١) . بعد وضع المادة في المخبـار يضاف الماء حتى يصل إلى العلامة المحفورة على عنق المخبار وحينئذ يكون حجم المحلول لتر واحد تماما .



الشكل ٣–٢١ . مخبار عياري . عندما يمتلىء عند الخط المحفور فانه يحتوى على لتر بالضبط . يستعمل هذا المخبار لتحضير محاليل دقيقة المولارية .

وقد يكون المحلول ١ مولار من هذه السكرات أقوى من اللازم لتجربتك مع النحل . وقد يكون من الأفضل تحضير لتر من كل محلول يحتوى على ٣٤,٢ جم و ١٨,٠٠ جم على التوالى. تسمى هذه المحاليل عُشر مولار (0.1 M) ولا يزال هذان المحلولان يحتويان على نفس العدد من الجزيئات لأن لكل منهما نفس المولية molarity.

كم عدد الجزيئات في مول واحد ؟ العدد كما تتوقع لابد أن يكون ضخماً : تقريبا ٦ × ١٠^٢٣ وهذا العدد يسمى عدد أفوجادرو وقد سُمى كذلك على إسم الكيميائي الذي حاول تقديره لأول مرة . لاحظ أن هذا العدد ينطبق على واحد مول من أي مادة أو جزىء أو أيون . ولذلك يمكن أن نقول واحد مول من الهيدروجين (١ جم).

٣-٩. الأس الهيدروجيني (درجة الحموضة) pH

أغلب الخلايا تكون شديدة الحساسية لدرجة حموضة السوائل المحيطة بها. وتقاس درجة الحموضة على مقياس من وحدات pH (الأس الهيدروجيني). عند إذابة جزيئات كلوريد الهيدروجين في الماء فإنها تتأين بالكامل تقريباً لتكوين أيونات الهيدرونيوم (H_3O^+) وأيونات الكلوريد (Cl^-) وعلى ذلك فان محلول 0.1 M من HCl يحتوي على تركيز 0.1 M من أيونات الهيدرونيوم ويوصف مثل هذا المحلول بأن الأس الهيدروجيني له هو ١ . ويمكن أن نعرِّف الأس الهيدروجيني بأنه اللوغاريتم السالب لتركيز أيونات الهيدروجين (أيونات الهيدرونيوم في الواقع) مقاساً بوحدات مول / لتر . وبتغير 0.1 الى التعبير العلمي نحصل على 1×10^{-1} والقيمة السالبة للأس هي ١ ولذلك فان الأس الهيدروجيني هو ١ . والمحلول الذي يحتوي على 0.01 مول/لتر (0.01 M) هو 1×10^{-2} M وعلى ذلك يكون الأس الهيدروجيني له هو ٢ وهو أقل حموضة بمقدار عشرة أضعاف من المحلول الأول.

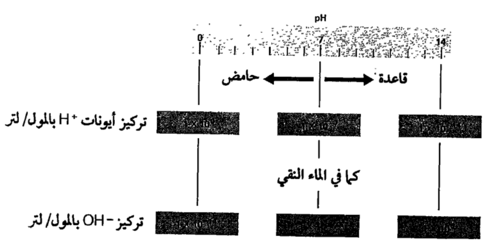
تتحلل جزيئات الماء بقدر قليل جداً لتكون أيونات (H_3O^+ و OH^-) ويحتوي لتر من الماء النقي على 10^{-7} مول من أيونات الهيدرونيوم ولذلك فإن الأس الهيدروجيني هو ٧. ولكن الماء النقى متعادل أي أنه لاحامضى ولا قاعدى. ولذلك فان الأس الهيدروجيني ٧ يكون متعادل. المواد القاعدية (أو القلوية) هي تلك التي

تتحد مع أيونات الهيدرونيـوم (مثـل NH_3 و HCO_3^-) لذا فانها تترك أيونات هيدرونيوم أقل مما يوجد في الماء النقي وهي بذلك تكون محاليل ذات أس هيدروجيني أكبر من ٧ (الشكل ٣-٢٢).

التغيرات الكيميائية CHEMICAL CHANGES

ذكرنا سابقاً أن النسب الوزنية للأكسجين و الهيدروجين في الماء هي ١٦ : ٢ وهذا إنعكاس للنسبة بين أعداد الذرات في الجزىء : ذرة أكسجين (وزن ذرى = ١٦) إلى ذرتين من الهيدروجين (وزن ذري = ١). إذا مر تيار كهربي في ماء يحتوي قدرا كافيا من الأيونـات ليجعله موصـلا جيدا للكهرباء فانه يمكننا تحليل الماء إلى مكوناتة : الهيدروجـين والأكسجـين. هذا تغـير كيميائي. لقد حدثت إعادة ترتيب للذرات. وبعبارة أخرى فان بعض الروابط قد تكسرت ونشأت روابط جديدة.

يمكن التعبـير عن هذا التغير الكيميائي بمعادلة. في الجانب الأيسر من المعادلة نكتـب الصيـغ الجزيئية لكل المواد الداخلـة فـي التفاعـل reactants في هذه الحالة



الشكل ٣-٢٢. مقياس الأس الهيدروجيني. كل تغير مقدارة وحدة من وحدات الأس الهيدروجيني يعني تغير قدرة عشرة أضعاف في الحموضة. المحلول ذو الأس الهيدروجيني ٧ يكون متعادلا.

توجد مادة واحدة H_2O ثم نرسم سهما ونكتب صيغ كل النواتج products. وكل من الأكسجين والهيدروجين في حالته العنصرية يوجد في صورة جزيئات ثنائية الذرات ولذلك فان لهما الصيغتان O_2, H_2 والآن تكون المعادلة على النحو $H_2O \rightarrow H_2 + O_2$. ولكن هناك خطأ ما. فالمادة لاتفنى ولا تستحدث وكل ذرة تشارك في تفاعل كيميائي لابد من أخذها في الحسبان في النواتج والعكس بالعكس. ولذلك لابد من إستخدام جزيئات من الماء لنحصل على جزىء واحد من O_2 وتحليل ٢ جزىء من الماء سوف ينتج ٢ جزىء من H_2 وبذلك تكون المعادلة النهائية المتوازنة كالآتي

$$2H_2O \dashrightarrow 2H_2 + O_2$$

لاحظ أن الأرقام التي تسبق الصيغ تدلنا على عدد الذرات والجزيئات في التفاعل. فاذا كنا مهتمين بالنسب الوزنية فلابد أن نضرب في الأوزان الجزيئية. فاذا فعلنا ذلك فأنه من كل ٣٦ وحدات وزنية من الماء نحصل على ٤ أجزاء من الهيدروجين و ٣٢ جزء بالوزن من الأكسجين. فاذا كانت هذه الوحدات الوزنية هي الجرام فاننا نكون قد حللنا ٢ مول من الماء وأنتجنا ٢ مول من الهيدروجين ومول واحد من الأكسجين. والمعادلة المتوازنة لاتنبئنا فقط عن طبيعة الموادالداخلة في التفاعل الكيميائي والناتجة منه ولكنها أيضا تدلنا على النسب التي تستهلك بها المواد المتفاعلة والتي تنتج بها المواد الناتجة منه. ولاحظ كذلك أن كل جرام من المادة يستعمل كمادة داخلة في التفاعل يعاود الظهور كنواتج.

٣-١١ طاقة الرابطة BOND ENERGY

في التحليل الذي سبق وصفه للماء كان لابد من مرور تيار كهربي في الماء. والكهرباء هي إحدى صور الطاقة. ويمكننا تعريف الطاقة بأنها القدرة على عمل الشغل. ويتطلب تحليل الماء بذل طاقة والسبب في ذلك أنه لابد من الطاقة لكسر الروابط الكيميائية. ولكى يكتمل التفاعل الكيميائي لابد من تكوين روابط كيميائية جديدة. تنطلق الطاقة عندما تتكون الروابط الكيميائية. وفي الواقع فانه لكل رابطة (على سبيل المثال الرابطة التساهمية بين الهيدروجين والأكسجين) تكون كمية الطاقة اللازمة لكسرها مساوية تماما لكمية الطاقة التي تتحرر عند تكوينها. هذه القيمة تسمى طاقة الرابطة.

هناك صور عديدة للطاقة . كهربية وكيميائية . . . . . الخ ولكن جميع صور الطاقة تتحول في النهاية إلى حرارة. ولذلك فمن المألوف (على الاقل بالنسبة لعلماء الأحياء) قياس الطاقة بوحدات الحرارة. والوحدة التي سوف نستعملها هي الكيلو سعر (Kcal) . الكيلو سعر هو كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة لتر ماء بقدر درجة مئوية (C°) واحدة (يوجد جدول يصف النظام الدولي للوحدات - وهي المستخدمة في كل الأعمال العلمية - على هيئة ملحق في آخر هذا الكتاب). والكيلو سعر هو أيضا الوحدة المستخدمة لقياس محتوي الأغذية من الطاقة ولذلك ينبغي أن يكون مألوفاً لكل من له علاقة بالتغذية والوصول إلى أو المحافظة على وزن معين للجسم.

نعود مرة أخرى إلى المثال فنجد أنه يلزم ١١٨ كيلو سعر من الطاقة لتحليل ٢ مول من الماء إلى عناصرة. في الواقع يلزم أكثر من ١١٨ كيلو سعر لتحليل مول واحد من الماء الى ذرات هيدروجين وأكسجين ولكن لأن هذه الذرات تترابط مع بعضها بسرعة لتكوين جزيئات من الهيدروجين والأكسجين فان بعضا من هذه الطاقة يعاد إطلاقها.

طاقة الرابطة للرابطة H-O هي ١١٠ كيلو سعر. وطاقة الرابطة للرابطة H-H هي ١٠٣ كيلو سعر وللرابطة O = O هي ١١٦ كيلو سعر. يتطلب تحليل ٢ جزيء من الماء كسر أربع روابط H-O أي ما يعادل ٤٤٠ كيلو سعر. وينتج تكوين ٢ مول من الهيدروجين ٢٠٦ كيلو سعر (٢ × ١٠٣) بينما ينتج تكوين ١ مول من الأكسجين ١١٦ كيلو سعر. وبطرح مجموع الطاقة المنطلقة (٢٠٦ + ١٦٦ = ٣٢٢ كيلو سعر) من الطاقة المستهلكة (٤٤٠ كيلو سعر) نحصل على الطاقة المبذولة وهي ١١٨ كيلو سعر التي قسناها من قبل.

أين ذهبت هذه الطاقة؟ بعبارة عامة فانها الآن طاقة كيميائية مختزنة في روابط جزيئات الهيدروجين والأكسجين. والطاقة المختزنة في هذا التفاعل تسمى أيضا بالطاقة الحرة لأنه كما سنري بعد قليل فان الطاقة مازالت متاحة لعمل شغل. ومن المفيد أن يكون لدينا رمز لهذه الطاقة الحرة وسوف نستعمل الحرف G (نسبة الى جوشوا ويللاردجيبز الذي وضع مبدأ الطاقة الحرة).

ماهي الطاقة الحرة؟ الطاقة الحرة هي الطاقة التي يمكن التحكم فيها لعمل شغل. الماء المختزن خلف سد له طاقة حرة وحينما يسمح لها بالسقوط خلال توربينات فأنه

يمكن توليد الكهرباء (صورة أخرى من صور الطاقة الحرة). التوتر المختزن في زنبرك الساعة هو طاقة حرة ويتم التخلص منه جزءاً فجزء لتحريك العقارب. ولكن بالنسبة لعلماء الأحياء فان أهم صورة من صور الطاقة الحرة هي الطاقة المختزنة في الروابط الكيميائية وهذه بدورها يمكن التحكم فيها لعمل شغل. عندما نرفع ثقلا فاننا نستخدم الطاقة الحرة المختزنة في روابط جزيئات الغذاء لتشغيل آلة هي عضلاتنا. ومع ذلك فان كفاءة تحويل الطاقة الحرة إلى شغل ليست ١٠٠٪ فعندما تتقلص عضلاتنا فإن كثيراً من الطاقة الحرة في الغذاء تنطلق على هيئة حرارة وهذه الطاقة لم تعد حرة فليس هناك من سبيل للتحكم في حرارة العضلات لأداء شغل مفيد.

عندما تدرس الكيمياء الفيزيائية فانك سوف تكتشف أن هناك إعتبارات عديدة أخرى متعلقة بفكرة الطاقة الحرة ولكنها لاتهمنا هنا وسوف تستخدم رموزاً أخرى كثيرة (مثل $\Delta G°$). ولكننا سوف نقتصر فقط على الرمز G كما سنرمز للتغير في الطاقة الحرة بالرمز ΔG . وفي تحليل الماء فان الطاقة لم تفقد ولكنها إختزنت في النواتج ولذلك فاننا نعطى التغير في الطاقة الحرة علامة موجبة وبذلك يمكن التعبير عن هذا التفاعل كالآتي :

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \ , \ \Delta G = +\ 118\ \text{Kcal}$$

إذا كنت محظوظا فأنك قد تكون شاهدت مرة مدرس الكيمياء وهو يشعل خليطاً من الهيدروجين والأكسجين. فاذا لم تكن شاهدت ذلك فليس أمامك ببساطة سوى أن تصدقنى بأن النتائج درامية (ولكن هذه التجربة محفوفة بالمخاطر فلا يجب أن تحاولها بنفسك). النتيجة هي إنفجار مرعب. والمعادلة الخاصة بهذا التفاعل الكيميائي هي عكس المعادلة السابقة تماما : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ أما الانفجار فهو يبين أن هناك إنطلاق للطاقة في هذه المرة. وفي الحقيقة فان التغير في الطاقة الحرة هو مرة أخرى ١١٨ كيلو سعر وذلك بسبب أن كسر الروابط $H\text{-}H$, $O=O$ يلزمة فقط ٣٢٢ كيلو سعر بينما يتحرر ٤٤٠ كيلو سعر عند تكوين ٤ مول من روابط $H\text{-}O$ ونعبر عن خروج الطاقة من النظام التفاعلي بوضع علامة سالبة قبل ΔG وبذلك تكون المعادلة على النحو التالي :

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O, \ \Delta G = -\ 118\ \text{Kcal / mole}$$

ما الـذي يحدد مقدار طاقة الرابطة لنوع معين من الروابط؟ هناك عوامل عديدة ولكن أهمها بالنسبة لنا هو الاختلاف في السالبية الكهربية بين الذرتين التي تنشأ الرابطة بينهما. فطاقة الروابط بين ذرات بينها فرق كبير في السالبية الكهربية تميل إلى الارتفاع. مثال ذلك المائة وعشرة كيلو سعر للرابطة H-O . مثـال آخـر هـام هـو الروابـط بيـن ذرات الأكسجـين والكربون في ثاني أكسيد الكربون CO_2 . تتقاسم ذرة الكـربـون زوجـيـن مـن الالـيكـتـرونـات مـع كل مـن ذرتي الأكسجيـن . وكـل مـن هـذه الروابـط المزدوجـة double bonds لها طاقة رابطة ١٨٧ كيلو سعر (أو حوالي ٩٣ كيلو سعر لكل زوج من الاليكترونات المقتسمة) وكلما زادت طاقة الرابطة كلما زادت الطاقة اللازمة لكسر الرابطة ولذلك فان الروابط بين الذرات ذات السالبيه الكهربية المتباينة تكون قوية جدا ومستقرة.

وعلى الجانب الاخر فان طاقة الروابط بين الذرات ذات السالبية الكهربية المتشابهة تميل الى القلة. وطبيعـي عنـدما تكـون الـذرات متشابهـة (مثل C-C, O = O) لايكون هنـاك إختلاف في السالبيه الكهربية وتكون طاقة الروابط منخفضة. فكل زوج من الاليكترونات المقتسمة في جزىء الأكسجين يعادل ٥٨ كيلو سعر باجمالي ١١٦ في كل جزىء كما رأينا من قبل. طاقة الرابطة C-C هي ٨٠ كليو سعر . وهناك فارق بسيط في السـالبية الكهـربية بين الكربون والهيدروجين وطاقة رابطة مقدارها ٩٨ كيلو سعر. وحسب التعريف فان الروابط ذات الطاقة المتدنية يكون كسرها أسهل ولذلك فان مثل هذه الروابط تكون أضعف وأقل استقرارا.

ينبغي علينـا أن نلاحظ أيضـا أن الـطاقة اللازمة لكسر رابطة ما (بين الكربون والأكسجـين) قد تتـأثـر بطبيعة الذرات الأخرى المتصلة بالذرات المعنية وعلى ذلك فالرابطة المزدوجة C = O في ثاني أكسيد الكربون (O= C = O) لها طاقة قيمتها ١٨٧ كيلو سعر بينما تكون هذه القيمة أقرب الى ١٨٠ كيلو سعر حينما توجد كجزء من جزىء أكبر مثل.

$$H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-CH_3,$$

ويسبب هذا التباين فانه من الحكمة أن نتكلم عن متوسط طاقة الرابطة. وباستخدام جدول متوسطات طاقة الرابطة المبين في الشكل (٣-٢٣) فاننا نتمكن من إكتشاف عدة مبادىء هامة مع تضحية بسيطة وغير هامة بالدقة العددية.

الشكل ٣-٢٣ .

متوسطات طاقة الرابطة كيلو سعر / مول		
C-H	٩٨	
O-H	١١٠	
C-C	٨٠	
C-O	٧٨	
H-H	١٠٣	
C-N	٦٥	
O=O	١١٦	(٥٨× ٢)
C=O	١٨٧*	(٩٣,٥× ٢)
C=C	١٤٥	(٧٢,٥× ٢)

* كما في حالة CO_2

٣-١٢ . تفاعلات الأكسدة - الاختزال
OXIDATION-REDUCTION REACTIONS

معظم التفاعلات التي درسناها تتضمن تغيير موقع إليكترونات . ففي تفاعل الكلور مع الصوديوم على سبيل المثال تفقد كل ذرة صوديوم إليكترون يذهب الى ذرة الكلور. في مثل تلك الحالة يقال للذرة التي فقدت إليكترون أنها تأكسدت oxidized أما الذرة التي إكتسبت إليكترون فيقال إنها إختُزلت reduced. والعمليتان مرتبطان ولا يمكن الفصل بينهما . فكلما فقدت مادة اليكترونات فانها تكون قد تأكسدت أما المادة التي اعطيت لها هذه الاليكترونات فأنها تسمى العامل المؤكسد. لاحظ كذلك أن أي مادة تعمل كعامل مؤكسد ويتم إختزالها . وحيث أن تفاعلات الأكسدة والإختزال متلازمة دائماً فإننا نسميها تفاعلات ريدوكس redox reactions.

قد تتعجب لماذا يسمى التفاعل بين الصوديوم والكلور أكسدة بينما الأكسجين لا دخل له بهذا التفاعل . والاجابة ببساطة أنها مسألة تاريخية . فالأكسجين له قابلية عالية للاليكترونات (هو العنصر ذو ثاني أعلى سالبيه كهربية) وهو لذلك عامل مؤكسد ممتاز

وشائع ويسبب فاعليته في هذا الدور فقد أمدنا باسم لكل التفاعلات من هذا النوع (في الواقع فإن الفلور هو الذي له أعلى سالبيه كهربية وربما كان الأصح أن تسمى العملية فلورة flouridation ولكن المصطلح يستعمل لعملية مختلفة تماما وهي إضافة كميات ضئيلة من أيونات الفلوريد F^- الى مصادر مياه الشرب).

بعض تفاعلات الأكسدة الحيوية تشتمل فعلا على إضافة الأكسجين الى الجزىء المتأكسد. عندما يتعرض الايثانول (كحول) للهواء وفعل بكتيريا الخل فانه يتحول الى حامض الخليك والماء (الخل) معادلة هذا التفاعل هي :

$$C_2H_5OH + O_2 \longrightarrow CH_3COOH + H_2O$$

نفس المعادلة باستعمال الصيغ الاليكترونية النقطية مبينة في الشكل (٣-٢٤) لاحظ ذرة الأكسجين التي أضيفت الى الايثانول لتكوين حامض الخليك. ولأن الفرق في السالبية الكهربية بين ذرات الكربون والأكسجين ليس بمثل الفرق بين الأكسجين والمغنيسيوم مثلا فان ذرة الأكسجين المضافة لاتبعد الاليكترونات بالقدر الذي يكفى لتكوين أيونات ولكنها مع ذلك تجتذب إليكترونين بعيداً عن ذرة الكربون وتقربهما منها (الشكل ٣-٢٤).

أكثر صور تفاعلات الأكسدة الأحيائية تكون بانتزاع ذرات الهيدروجين من مادة. وأكسدة الايثانول يتمثل فيها هذا النوع من الأكسدة حيث تستبعد ذرتي هيدروجين بواسطة ذرة الأكسجين الثانية وهي تتحد جميعا لتكوين جزىء ماء. وعلى الرغم من أن تفاعلات الأكسدة تكون مصحوبة دائما بالاختزال فأننا غالبا ما نبرز جانب الأكسدة في التفاعلات حينما تنتقل الاليكترونات من ذرة ذات سالبيه كهربية ضعيفة إلى أخرى ذات سالبيه كهربية قوية. وما تفاعلات الصوديوم مع الكلور والهيدروجين مع

```
  H  H                          H              H
 •×  •×  ••        •   •       •×   ••        •×
H×C :C :O×H + :O:O: ──> H×C :C :O×H + H×O:
 ×•  ×•  ••        ••  ••      ו   ••        ••
  H  H                          H  ::
                                   :O
                                    ••
```

الشكل ٣-٢٤ . أكسدة الايثانول. تحدث الأكسدة عن طريق إضافة ذرة أكسجين ونزع ذرات هيدروجين. في كل حالة تتباعد إليكترونات عن ذرات الكربون.

الأكسجين والايثانول مع الأكسجين إلا أمثلة لذلك. وفي كل هذه الحالات تنطلق الطاقة الحرة وذلك لأن الروابط الضعيفة قد كسرت وروابط قوية نشأت. ونحن نستغل تفاعلات الأكسدة التي تتميز بقيم عالية من G △ لتدفئة بيوتنا وتسيير مركباتنا وممارسة كل النشاطات الأيضية الضرورية للحياة.

من الممكن أيضا اعادة إليكترونات من ذرات عالية السالبية الكهربية إلى ذرات ضعيفة السالبية الكهربية. في هذه الحالة تكون G △ ذات قيمة موجبة أي أنه لابد من بذل بعض الطاقة لاتمام التفاعل. وعادة ما نبرز جانب الاختزال في مثل هذ التفاعلات. ولنأخذ مثلا سابقا وهو أن تحليل ٢ مول من الماء كان يتطلب بذل ١١٨ كيلو سعر. فقد أكسدنا ذرات الأكسجين (لفقدها للاليكترونات) وإختزلنا ذرات الهيدروجين. لقد كسرنا في الواقع روابط قوية (H-O) ونشأت روابط ضعيفة H-H, O-O وعلى ذلك فان الروابط الضعيفة تعمل كوسيلة لتخزين الطاقة وهذه الطاقة كيميائية. وبمجرد أن نسمح للاليكترونات بالعودة إلى الذرات عالية السالبية الكهربية تنطلق الطاقة.

وسوف نرى في البابين ٧ ، ٨ أن الحياة على الأرض يمكنها أن تستمر لأنها تستغل تفاعلات ريدوكس. فهي تستخدم هذه التفاعلات لاختزان الطاقة الشمسية ثم لاطلاق هذه الطاقة عند الحاجة لأداء الوظائف المميزة للكائنات الحية. في البناء الضوئي تستغل الطاقة الشمسية لنقل الاليكترونات (المرتبطة مع البروتونات – أي ذرات الهيدروجين) من ذرات عالية السالبية الكهربية (الأكسجين) إلى ذرات ضعيفة السالبية الكهربية (الكربون). في هذه العملية تنكسر روابط قوية (H-O , C-O) وتنشأ روابط ضعيفة (C-H وعلى الأخص O-O) . عكس هذه العملية هو التنفس الخلوى ففي هذه الحالة تعود الاليكترونات إلى شركائها الأصليين وتتحرر الطاقة التي كانت قد إختزنت لتفيد الكائن الحي. وعلى ذلك فان الفوارق في طاقة الروابط الكيميائية تجعل من الممكن تشغيل نوع من البطاريات: إختزان طاقة الشمس وإطلاقها عند الحاجة للمحافظة على الحياة.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

الكائنات الحية مخلوطات معقدة من المركبات. من بين العناصر التسعين الموجودة على الارض يشترك ٢٤ في نشاطات الحياة. ذرات كل عنصر تحتوي على عدد خاص

بها من البروتونات ومثلة من الاليكترونات . عدد وترتيب الاليكترونات يحدد الخواص الكيميائية للعنصر . تتكـون المركبـات من ذرات موجـودة مع بعضهـا بنسب ثابتة وتتماسك الذرات بروابط أيونية أو تساهمية أو تساهمية قطبية ويعتمد نوع الروابط بين الذرات الى درجة كبيرة على السالبية الكهربية للذرتين . وحينما تكون الروابط تساهمية أو تساهمية قطبية فان الذرات تكون جزيئات .

يتطلب كسر الرابطة الكيميائية قدراً معيناً من الطاقة يسمى طاقة الرابطة . وتنطلق نفس الكمية من الـطاقة عندما تنشأ تلك الرابطة . وجود ذرة هيدروجين بين ذرتين عاليتى السالبية الكهربية (مثل ذرات الأكسجين) يسمح بتكوين رابطة هيدروجينية وبينما تكون طاقة الروابط الهيدروجينية أقل منها في الأنواع الأخرى من الروابط فان للروابط الهيدروحينية وظائف أساسية في المادة الحية .

لأن الأيونات والجزيئات القطبية تنجذب الى جزيئات الماء فانها توصف بأنها محبة للماء أما الجزيئات غير القطبية فانها لاتنجذب نحو جزئيات الماء ولذا فهي كارهة للماء .

أي مركب يطلق بروتونات فهو حامض وكل مركب يجتذب البروتونات فهو قاعدة . ودرجة حموضة المحلول هى دالة تركيز البروتونات فيه ويتم التعبير عنها بمقياس الأس الهيدروجيني .

تفاعلات ريدوكس تشتمل على إنتقال إليكترونات من مادة (أيون أو جزىء) إلى أخرى . المادة التي تفقد إليكترونات تتأكسد والمادة التي تكتسب اليكترونات تختزل . والـطاقـة إمـا أن تختـزن أو تتحـرر في تفـاعـل ريدوكس ويتـوقف ذلك على إنتقال الاليكترونات من ذرات عالية أو منخفضة السالبيه الكهربية .

لعلك تكون قد وعيت الآن وبعد دراسة هذا الباب ما لمبدأ السالبية الكهربية من أهمية واسعـة فقـد رأينـا الـدور الـذي تلعبة السالبية الكهربية في تحديد ما إذا كان لتفاعلات ريدوكس $\Delta G -$ أو $\Delta G +$. ومن خلال الربط بين النوع الأول والنوع الثاني فقط يمكن لتلك الجزيئات المنظمة المعقدة التي هي الحياة أن توجد على الأرض .

وقد رأينا تأثير السالبية الكهربية على مقدار طاقة الروابط وبالتالي على قوة وضعف الروابط الكيميائية كما رأينا كيف أن الفوارق في السالبية الكهربية تخلق روابط قطبية

تؤدي بدورهـا إلى تخليق مركبـات قطبية والقطبية (أو غيابها) تؤدي بالتالي إلى درجة الـذوبان في الماء أي إما أن تكون المادة محبة للماء أو كارهة له. الفوارق في السالبية الكهربية وقطبية الجزيئات أو أجزاء الجزيئات الناجمة عنها تهيىء المجال لتكوين روابط هيدروجينية وكما سنرى في الباب التالي فان الروابط الهيدروجينية تلعب دورا هاما في تكـوين الجـزيئـات العمـلاقـة المميزة للمادة الحية : الـبروتينـات والأحماض النووية وعديدات التسكر.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ـ أي المواد الآتية تتكون من جزيئات : (١) الأكسجين
(ب) الماء. (ج) كلوريد الصوديوم
(د) الجلوكوز (هـ) الصلب ؟

٢ ـ فرق بين الذرة والأيون.

٣ ـ ماهو الأيون الذي تنتجة جميع الأحماض ؟

٤ ـ ماهـو وزن مول من الميثان CH_4 بالجرام؟

٥ ـ كم ميلليجرام (مجم) من الجلوكوز تذيبها في لتر من الماء لتحضير محلول تركيزة واحد جزء في المليون (ppm) ؟

٦ ـ أكتب الصيغة الاليكترونية النقطية لجزيئات :
(أ) الماء (ب) الأمونيا
(ج) الميثان (د) الايثان CH_3CH_3)

٧ ـ لخص الاختلافات بين المخاليط والمركبات.

٨ ـ ميز بين المركبات العضوية والمركبات غير العضوية.

٩ ـ أي العناصر الآتية تتوقع أن تتفاعل مع الكلور :
(أ) الهيدروجين (ب) النيون
(ج) الصوديوم (د) الفلور
(هـ) الكالسيوم (و) الكربون؟

١٠ ـ الـتـحليل الكيميائي لمادة مايثبت أن النسبـة بين ذرات الكـربـون وذرات

الهيدروجين هي ١ : ٣ والوزن الجزيئي لهذه المادة هو ٣٠. ما هي الصيغة الجزيئية ؟

١١ ـ بين بالصيغة الاليكترونية النقطية اتحاد ذرة الليثيوم (٣ إليكترونات) مع ذرة الفلور (٩ إليكترونات).

١٢ ـ يحتاج الطالب الى ٢٠٠ ميلليتر من محلول 0.1 M هيدروكسيد الصوديوم. ما هو وزن المادة الصلبة المستعملة ؟

١٣ ـ ما هو الوزن الجزيئي (MW) لحامض الخليك CH_3COOH ؟

١٤ ـ أي المواد الآتية تتوقع أن تذوب بسهولة في الماء - إشرح :

(أ) KCl (ب) CCl_4 (ج) N_2 (د) CH_3COOH ؟

١٥ ـ ماهو حجم محلول من حامض الهيدرو كلوريك تركيزة 0.4 M يتعادل مع ٢٠٠ ميللیلتر من محلول Na OH تركيزة 0.2 M ؟

١٦ ـ حاول أن تتنبأ إذا كان الأس الهيدروجيني أكبر أو أقل من ٧ عند إذابة كل من المواد الآتية في الماء :

(أ) HBr (ب) $NaHCO_3$ (ج) C_6H_5COOH (د) CH_3NH_2

(هـ) NaCl .

١٧ ـ حول ٩٨,٦ درجة فهرنهايت إلى درجات مئوية.

١٨ ـ ماهو الأس الهيدروجيني لمحلول فيه 0.001-M من أيونات الهيدروجين؟

١٩ ـ أكتب الصيغة الاليكترونية النقطية لرابع كلوريد الكربون CCl_4 .

٢٠ ـ حينما يحترق الميثان CH_4 في جو من الأكسجين ينتج ثاني أكسيد الكربون والماء. أكتب معادلة متوازنة للتعبير عن هذا التغير الكيميائي. ما هو التغير في الطاقة الحرة (ΔG) لهذا التفاعل؟ هل ΔG سالبه أو موجبة؟ ما هي المادة التي تأكسدت؟ وما هي المادة التي إختزلت؟

REFERENCES المراجع

1. BAKER, J.J. W., and G.E. ALLEN, Matter, Energy, and Life : An Introduction for Biology Students, 4th ed., Addison-Wesley, Reading, Mass., 1981. A small book that covers topics in chemistry and physics, elected and developed with the needs of biology students in mind.
2. ALLEN, T.L., and R.M. KEEFER, Chemistry : Experiment and Theory, Harper & Row, New York, 1974 An introductory textbook.

CHAPTER 4 الباب الرابع

THE MOLECULES OF LIFE جزيئات الحياة

الباب الرابع

جزيئات الحياة

الشكل ٤-١ الجزيئات العضوية هي البروتينات والأحماض النووية والدهون وغيرها من الليبيدات والفيتامينات. البقية غير عضوية.

التركيب الجزيئي للطفل البشري	
ماء	٪٦٦
بروتين + احماض نووية	٪١٦
دهون وليبيدات	٪١٢,٥
رماد (معادن)	٪٥
كربوهيدرات	٪٠,٥
فيتامينات	آثار

العنصر الوحيد الذي يميز المادة الحية أكثر من سواه هو الكربون. الكربون مهيأ لهذا الدور لأن (١) يمكنه تكوين أربع روابط تساهمية مع أربع ذرات أخرى أى أنه رباعي التكافؤ، (٢) يمكنه تكوين روابط تساهمية مع ذرات كربون أخرى لتكوين سلاسل. هاتان الخاصيتان تمكنان الكربون من العمل كعمود فقرى لتكوين أنواع تكاد تكون لانهائية من الجزيئات. هذا التنوع ضروري لهذا التنظيم بالغ التعقيد لمادة كالمادة الحية لاعجب إذن أن تكون الجزيئات المحتوية على الكربون هي أساس الحياة نفسها (الشكل ٤-١). وفي الحقيقة فإن كيمياء مركبات الكربون تسمى الكيمياء العضوية Organic Chemistry حيث أن هذه المركبات ترتبط إرتباطا شبه تام بالكائنات الحية.

٤-١ الهيدروكربونات HYDROCARBONS

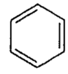
أبسط الجزيئات العضوية هي الهيدروكربونات وهي التي تتكون فقط من الكربون والهيدروجـين. والميثـان CH_4 هو أبسط الهيدروكـربـونات. ولكن بفضل قدرة ذرات الكربون على الترابط مع بعضها فان الهيدروكربونات توجد في سلاسل. وعلى سبيل المثال فان الأوكتان (وهو احد مكونات الجاوزلين) به ثمان ذرات كربون متصلة ببعضها في سلسلة مستقيمة وصيغتة التركيبية هي :

```
   H  H  H  H  H  H  H  H
   |  |  |  |  |  |  |  |
H—C—C—C—C—C—C—C—C—H
   |  |  |  |  |  |  |  |
   H  H  H  H  H  H  H  H
```

توجـد الهيدروكـربـونـات أيضاً في حلقات. والبنزين هو أكثرها إنتشاراً وله الصيغة التركيبية

```
        H
        |
        C
      //  \
H—C        C—H
   |        ||
H—C        C—H
      \\  /
        C
        |
        H
```

لاحظ أن ذرات الكربون يمكنها أن تترابط فيما بينها بواسطة روابط تساهمية مزدوجة تماما كما تترابط بروابط تساهمية مفردة. وسيكون لدينا الفرصة للتعامل مع مركبات حلقية. ولكى يسهل تفسير صيغ هذه المركبات فاننا سوف نرسم الحلقة من ذرات الكربون كشكل هندسي بسيط – الشكل السداسي مثلا للبنزين. وعلى ذلك يمكن رسم حلقة البنزين كالاتى :



٤-٢ الليبيدات LIPIDS

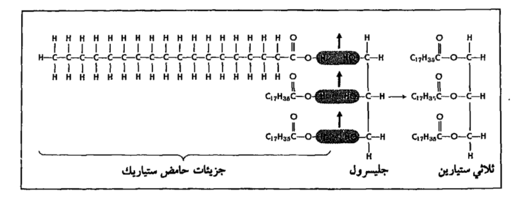
الليبيدات هي مركبات عضوية كارهة للماء أي أنها قليلة أو عديمة الذوبان فيه. توجـد أنـواع من الليبيدات في الخلايا الحية ولكنا سوف نركز على ثلاث منها فقط : الدهون والفوسفوليبيدات والستيرويدات.

يتكـون جزيء الـدهن من أربعة أجزاء: جزيء جليسرول وثلاثة جزيئات من الأحمـاض الـدهـنية (الشكـل ٤-٢). ويتكـون كل حامض دهني من سلسلة هيدروكـربـونية في إحـدى نهاياتهـا مجموعة كربوكسيل. جزيء الجليسرول به ثلاث مجمـوعـات هيدروكسيل (OH-) و كل منهـا تستطيع التفاعل مع مجموعة كربوكسيل لحامض دهني ويُنتزَع جزيء ماء في هذه العملية ليتصـل الحامض الدهني بجزيء الجليسرول (الشكل ٤-٢). وقد تكون الأحماض الدهنية الثلاثة في جزيء واحد من الدهن متشابهة أو قد تكون مختلفة. وقد تتكون من عدد قليل من ذرات الكربون يصل إلى أربعة أو قد يزيد العدد ليصل إلى ٢٤ . لأن الأحماض الدهنية تتخلق من قطع تحتوي على ذرتين من الكربون فان عدد ذرات الكربون في السلاسل يكون زوجيا دائما تقريبا.

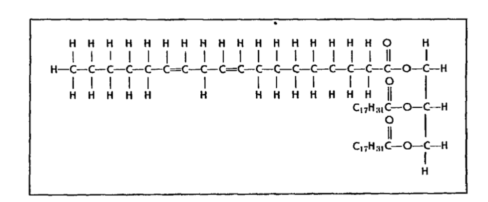
حامض البالميتيك وبه ١٦ ذرة كربون وحامض الستياريك (١٨ ذرة كربون) هما أوسع الأحماض الدهنية إنتشاراً في الدهون الحيوانية.

توجـد ببعض الأحمـاض الدهنية رابطة أو رابطتان مزدوجتان بين ذرات الكربون

الشكل ٤-٢. تخليق الدهن ثلاثي ستيارين



(الشكل ٤-٣). الدهون التي تتكون من هذه الجزيئات توصف بأنها غير مشبعة -un saturated و ذلـك لأن هذه الأحمـاض الـدهنية يمكنهـا إستيعاب المزيد من ذرات الهيدروجـين. الدهون غير المشبعة لها درجات إنصهار أقل مما للدهون المشبعة ولأن أغلبهم سائل عند درجة حرارة الغرفة فاننا نسميهم زيوت. وما زيت بذرة القطن وزيت الفول السوداني وزيت السمسم وزيت الزيتون إلا أمثلة شائعة من محتويات المطبخ. وكما يبدو من هذه القائمة فان الدهون النباتية تميل إلى أن تكون غير مشبعة (و بالتالي فهي زيوت) بينما الدهون الحيوانية تميل إلى أن تكون مشبعة. وهناك دلائل متزايدة على أن الغـذاء الغني بالـدهـون المشبعـة مرتبط بحـدوث أمراض القلب والشرايين الرئيسية. أما الدهون غير المشبعة فلا يبدو أن لها مثل هذا التاثير. الصيغة الجزيئية لثـلاثي ستيارين (دهن حيواني شائـع) هي $C_{37}H_{110}O_6$ النسبـة الكبـيرة بين ذرات الهيدروجين وذرات الأكسجين تدلنا على أن هذا الجزيء مختَزل بدرجة عالية. الغالبية العظمى من الروابط التساهمية هي C-C , C-H بمتوسط طاقة رابطة مقدارة حوالى ٨٠ كيلو سعر و ٩٨ كيلو سعر على التوالي. وهذه الروابط ضعيفة نسبياً كما قد نتوقع ذلك من الفـوارق الـطفيفـة جداً في السالبية الكهربية بين الذرات. وذلك يعني إذن أن الدهون هي مستودعات غنية بالطاقة وفي الواقع فإن الدهون والزيوت تمد الكائن بأعلى إحتياطى متاح من الطاقة المركزة. الشكل ٤-٤ يبين بندقة مشتعلة وكأنها شمعة بفضل مخزونها الكبير من الزيت.



الشكـل ٤-٣. تركيب الـدهن غير المشبـع ثلاثي لينـولـين. توجـد رابـطتان مزدوجتان في كل وحدات الحامض الدهني. تسيل الدهون غير المشبعة عند درجة حرارة أقل من درجة إنصهار الدهون المشبعة ولذا فهي تسمى زيوت.



الشكل ٤-٤ . بندقة مشتعلة .

كما يعني الغياب شبة الكامل لأي فوارق في السالبية الكهربية أن جزيئات الدهون ليست ذات طبيعية قطبية بالمرة (ونصفها بأنها لاقطبية apolar) وهذا هو سبب كراهيتها للماء وعدم قدرتها على الارتباط بجزيئات الماء ذات القطبية القوية . وعلى ذلك فان خليط من الزيت والماء لايلبث أن ينفصل إلى طبقة من الزيت تطفو على سطح الماء .

عنـد معـالجـة دهن بقاعدة قوية مثل هيدروكسيد الصوديوم تتكسر الروابط بين الأحمـاض الـدهنية والجليسرول . مجمـوعـات الهيدروكسيل (-OH) من Na OH تعيد جزيئات الجليسرول بينما أيونات الصوديوم تنجذب نحو مجموعات الكربوكسيل في كل حامض دهني . فاذا بدأنا مثلا بجزيء ثلاثي ستيارين فاننا نحصل على ثلاثة جزئيات من ستيارات الصـوديوم وجـزيء واحـد من الجليسرول (الشكل ٤-٥) . ستيارات الصوديوم هي الصابون . في الحقيقة فقد إستعملت مجتمعات ما قبل التصنيع نفس هذه العملية لتحضـير الصابون من منتجات تتراكم بالمنازل : الدهن ورماد الخشب (وهو مصدر للحصول على Na OH)

وظيفة الصابون أو أي منظف آخر هي أن يجعل المواد الزيتية قابلة للاختلاط بالماء . وبالنظر إلى تركيب ستيارات الصوديوم يمكن أن نرى لماذا تتصرف على هذا النحو . فإحدى نهايات الجزيء هيدروكربونية مما يعني أنها كارهة للماء ويمكنها أن تختلط بسهولة مع مواد أخـرى كارهة للماء مثل الزيوت . أما النهاية الأخرى فإنها مشحونة وبالتالي قطبية وهي محبة للماء وتتفاعل مع جزيئات الماء . تكون النتيجة جزيء مزدوج المحبة

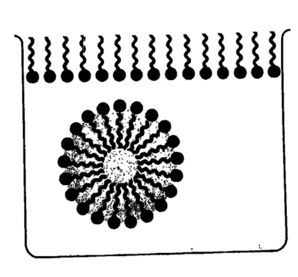
$$\begin{array}{l} \quad\quad\quad\quad\quad\quad H \\ \quad\quad\quad\quad\quad\quad | \\ C_{17}H_{35}COO-C-H \\ \quad\quad\quad\quad\quad\quad | \\ C_{17}H_{35}COO-C-H + 3NaOH \rightarrow 3C_{17}H_{35}COONa + C_3H_8O_3 \\ \quad\quad\quad\quad\quad\quad | \\ C_{17}H_{35}COO-C-H \\ \quad\quad\quad\quad\quad\quad | \\ \quad\quad\quad\quad\quad\quad H \end{array}$$

ستيارات الصوديوم — جليسرول

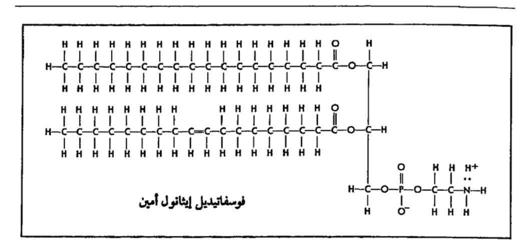
شكل ٤ ـ ٥. تكوين ستيارات الصوديوم «صابون» والجليسرول من ثلاثيستيارين وهيدروكسيد الصوديوم. سلسلة الهيدروكربون في جزيء الصابون كارهة للماء بينما النهاية المحتوية على مجموعة الكربوكسيل محبة للماء.

للماء amphiphilic كارة للماء عند إحدى النهايات ومحب للماء عند الأخرى، عندما يختلط بالماء لايمكنه تكوين محلول حقيقي ولكن يكوِّن قطرات (الشكل ٤-٦) حيث تكون الرؤوس المحبة للماء من جزيئات الصابون معرضة للماء بينما الذيول الكارهة للماء في الداخل مختلطة مع المواد الأخرى الكارهة للماء (مثل الشحم). هذه القطرات تكون مستحلب emulsion .

الليبيدات مزدوجة المحبة للماء هي إحدى المكونات الرئيسية للخلايا. في أكثر هذه المواد إنتشاراً تحل مجموعة قطبية محل واحد من الأحماض الدهنية في جزيء دهن. في معظم الحالات تحتوي هذه المجموعة القطبية على مجموعة فوسفات (PO_4) ولذلك



الشكل ٤-٦. طريقتان لتفاعل جزيئات المنظف مثل الصابون مع الماء. يكون الصابون طبقة عند سطح الماء بحيث تكون الذيول الكارهة للماء متجهة بعيداً عن الماء وتكون قطرة الزيت البعيدة عن سطح الماء مكسوة بجزيئات الصابون التي تتجه رؤوسها المحبة للماء نحو الماء بينما تكون الذيول الكارهة للماء متجهة نحو قطرة الزيت وهذا يكون مستحلب من الزيت والماء.



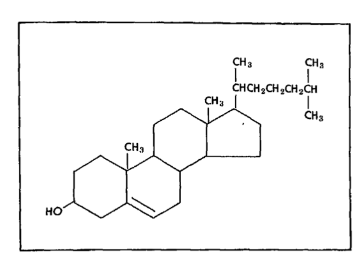
الشكل ٤-٧. تركيب فوسفوليبيد عادي - جزيء مزدوج المحبة للماء. السلاسل الهيدروكربونية كارهة للماء بينما الشحنات على مجموعات الفوسفات والأمينو تجعل هذا الجزء من الجزيء محب قوي للماء. الفوسفاتيديل إيثانول أمين هو أحد المكونات الرئيسية لاغشية الخلية.

تسمى هذه المركبات بالفوسفو ليبيدات phospholipids . أكثر هذه الفوسفوليبيدات فـي الخـلايا هـو فوسفاتيديل إيثانول أمين phosphatidyl ethanolamine أو كيفالين cephalin (الشكـل ٤-٧). وسوف نرى في الباب التالي أن هذا الفوسفوليبيد هو مكون رئيسي في الأغشية المختلفة المستخدمة في بناء الخلايا.

يتم تخليق وإفراز مجموعة أخرى من الليبيدات مزدوجة المحبة للماء في كبد الثدييات وهي أملاح المرارة bile salts . هذه الليبيدات مختلفة تماما في التركيب عن الدهون والفوسفوليبيدات. ومع ذلك فان طبيعتهم مزدوجة المحبة للماء - كارهة للماء في أحد أجـزاء الجزيء ومحبة للماء في الآخر - جعلت منهم منظفات ممتازة. فهي تستحلب الدهون المأكولة مما يسهل كثيرا هضم وإمتصاص الدهون في الامعاء.

والأملاح المرارية أعضاء في مجموعة كبيرة من الليبيدات المتشابهة تسمى ستيرويدات steroids . جميع الستيرويدات لها هيكل من ١٧ ذرة كربون مرتبة في أربع حلقات (الشكل ٤-٨). يختلف كل ستيرويد عن الآخر في موقع وطبيعة المجموعات الجانبية المتصلة به وغالبا في موقع بعض الروابط المزدوجة.

أكثر الستيرويدات وجوداً في الجسم البشري هو الكوليستيرول cholesterol (حوالي نصف رطل لكل شخص) ومنه يتم تخليق الأملاح المرارية وأحد الفيتامينات (د) وعدد من الهـورمـونـات. جميع هورمـونـات الجنس (مثـل الاستروجينات estrogens)



الشكل ٤-٨. الكوليستيرول أكثر الستيرويدات وجودا في الجسم البشري. مثل كل الستيرويدات فهو يتركب من هيكل به ١٧ ذرة كربون مرتبة في ٤ حلقات (ملونة). الكوليستيرول هو المادة التي يبدأ منها تخليق الستيرويدات الأخرى التي يستخدمها الجسم.

والبروجسترون progesterone و التستوستيرون testosterone هي ستيرويدات.

٤-٣ الكربوهيدرات CARBOHYDRATES

الكربوهيدرات لها الصيغة الجزيئية العامة CH_2O وبهذا التعبير ترى لماذا كان يظن أنها تمثل كربون متميىء hydrated carbon ولكن في الواقع ترتيب الذرات ليس له إلا علاقة طفيفة بجزيئات الماء.

إثنان من الكربوهيدرات الشائعة هما النشا والسيليلوز وكلاهما جزيئات ضخمة ذات أوزان جزيئية بمئات الآلاف. وإنهم من الضخامة بحيث أننا نسميها الجزيئيات الكبيرة macromolecules وكل منهم عبارة عن بوليمر polymer أي أن كلا من جزيئات النشا والسيليلوز يتكون من وحدات عديدة متكررة تماماً كما في سلسلة مكونة من حلقات. والحلقات في كل من النشا والسيليلوز واحدة : وحدات من السكر تسمى جلوكوز glucose. فجزيئات الجلوكوز إذن هي الوحدات monomer التي يتكون منها كل من هذه البلمرات.

السكرات SUGARS

الجلوكوز له الصيغة الجزيئية $C_6H_{12}O_6$ وصيغته التركيبة مبينة في الشكل (٤-٩). تترابط خمس من ذرات الكربون الست مع ذرة الأكسجين في حلقة، أما بقية الذرات فانها تمتد فوق أو تحت مستوي الحلقة ونسبة إلى وجود ست ذرات كربون فان

جلوكوز جالاكتوز فركتوز

الشكل ٤-٩. الصيغة التركيبية للجلوكوز واثنين من نظائره الضوئية.

الجلوكـوز يسمى سكر سداسي hexose . سكران سداسيان شائعان هما الجالاكتوز (وهـو يوجد في اللبن والزبادي) والفركتوز (وهو سكر موجود في العسل). وكل من الجالاكتوز والفركتوز له الصيغـة الجزيئيـة $C_6H_{12}O_6$ وهي نفس صيغة الجلوكوز. ولكن بالنظر إلى الشكل (٤-٩) نرى أن الترتيب الفعلي للذرات مختلف في كل من الحالات الثلاث. يختلف الجالاكتوز عن الجلوكوز من حيث توجيه ذرة الهيدروجين ومجمـوعـة الهيدروكسيل المتصلتان بذرة الكربون رقم ٤ . في الجالاكتوز تمتد مجموعة الهيدروكسيل فوق مستـوي الحلقـة بينـما هي تمتد تحت مستوي الحلقة في الجلوكوز (الشكل ٤-٩). في الفركتوز تساهم خمس ذرات فقط في تكوين الحلقة. مواد مثل ذلك لها نفس الصيغة الجزيئية ولكن الصيغات التركيبية لها تكون مختلفة تسمى نظائر تركيبية structural isomers .

الجلوكوز والجالاكتوز والفركتوز أمثلة لسكريات «مفردة» أو أحاديات التسكر monosac-charides. لتكـوين سكـر مزدوج أو ثنـائي التسكر disaccharide السكروز (السكر الذي تضعـه في القهـوة) يتكون من جزيء جلوكوز وجزيء فركتوز. وعلى الرغم من أن عملية الربط بينهما معقدة تماما فان النتيجة النهائية هي فقد ذرة هيدروجين من أحد أحاديات التسكر ومجموعـة هيدروكسيـل من الاخـر . وعلـى ذلـك تكـون الصيغـة الجزيئيـة للسـكـروز هـي $C_{12}H_{22}O_{11}$ (أي $2C_6H_{12}O_6 - H_2O$)

سكران ثنائيان آخران هما اللاكتوز (السكر الرئيسي فى اللبن) والمالتوز (أحد نواتج هضم النشـا). يتكون اللاكتوز من جزيء جلوكوز مرتبط بجزيء جالاكتوز. أما المالتوز فهو يتكون من جزيئين من الجلوكوز مترابطين معا (الشكل ٤-١٠).

مالتوز

الشكل ٤-١٠.
تركيب المالتوز.

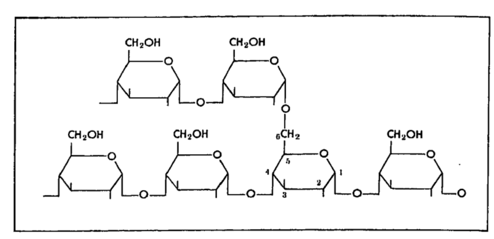
جميع السكـرات شديدة الـذوبـان في الماء وذلك بسبب إحتوائها على العديد من مجمـوعـات الهيدروكسيل. القـطبية النـاشئـة عن السـالبية الكهربية العالية لذرات الأكسجين تسمح بالتجاذب السهل مع جزيئات الماء.

السكرات هي وقود هام للعديد من الكائنات الحية وهي ليست بنفس تركيز الدهون لأنها ليست تامـة الاختزال ولكن قابليتها للذوبان في الماء تسمح بانتقالها بسهولة في سوائـل الجسم. الجلوكوز في الواقع هو سكر الدم عند البشر وهو أهـم مصدر طاقة للعديد من الخلايا.

النشويات STARCHES

النشويات هي بلمرات من الجلوكوز ومنها نوعان. الأميلوز amylose يتكون من سلاسل خطية غير متفرعة تشتمل على عدة مئات من وحدات الجلوكوز (أو الرواسب كما جرت العادة على تسميتها). وترتبط رواسب الجلوكوز ببعضها بين ذرتي الكربون رقم ١ ورقـم ٤ (الشـكل ٤-١١). الأميلوبكتين amylopectin يختلف عن الأميلوز في أنه غزير التفرع. عند كل من الراسب الثلاثين على طول السلسلة توجد سلسلة جانبية قصيرة متصلة بذرة الكربون رقم ٦ (ذرة الكربون التي تعلو الحلقة). في كل من هذه السلاسل القصيرة يوجد حوالي ٢٤ راسب والمجموع الكلي لرواسب الجلوكوز في جزيء الأميلوبكتين هو عدة الاف.

النشـويات غير قابلة للذوبـان في المـاء ولذلك فهي تعمل كمستودعات لتخزين الجلوكـوز. والنبـاتات تحول الجلوكوز الزائد إلى نشا. والأرز والقمح والذرة مصادر رئيسية للنشا في غذاء الانسان.



الشكل ٤-١١ . تركيب النشا. تترابط وحدات الجلوكوز من خلال ذرات الكربون رقم ١ و رقم ٤ لتكوين سلاسل مستقيمة. تتصل السلاسل الجانبية القصيرة بالسلسلة الرئيسية عند ذرة الكربون رقم ٦ .

لابد من هضم النشويات قبل أن تدخل إلى الخلايا أو تخرج منها وهذا يعني ببساطة أن السلاسل الطويلة لابد أن تنكسر إلى سكرات وتسمى العملية بالتميؤ hydrolysis وهي تتطلـب الماء وإنزيـم هاضم للنشا يسمى الاميليز amylase . تدخل جزيئات الماء عند الترابط ١-٤ بمعاونـة الأميليز وبذلك تنكسر السلسلة (الشكل ٤-١٣). إنزيمات الأميليز التي ينتجها الجهاز الهضمى للإنسان تميىء النشا وتحوله إلى خليط من المالتوز والجلوكوز .



الشكل ٤-١٢ . حبيبات النشا في خلايا البطاطس وقد اصطبغت قليلا باليود لاحظ جدر الخلايا .

الشكل ٤-١٣. تميوء الأميلوز بواسطة إنزيم الأميليز في البنكرياس وينتج خليط من الجلوكوز والمالتوز. لايستطيع الأميليز كسر الروابط ١ - ٦ عند نقاط التفرع في الأميلوبكتين (الشكل ٤-١١) حيث يقوم بذلك إنزيم آخر.

تختزن الحيوانات الجلوكوز الزائد عن طريق بلمرتة إلى جلايكوجين glycogen . تركيب الجلايكوجين مشابه لتركيب الأميلوبكتين إلا أن الأفرع في الجلايكوجين تميل إلى أن تكون أقصر وأكثر عدداً.

السيليلوز CELLULOSE

السيليلوز هو أكثر المركبات العضوية إنتشاراً في الأحياء. والسبب في سعة إنتشاره هو أنه المادة الأساسية التي تتركب منها النباتات. معظم الخشب من السيليلوز بينما القطن والورق فهما سيليلوز نقى تقريباً.

مثل النشا فان السيليلوز هو عديد التسكر ووحدته هي الجلوكوز (الشكل ٤-١٤). ومع ذلك فإن إتجاه الروابط بين ذرة الكربون رقم ١ من إحدى وحدات الجلوكوز وذرة الكربون رقم ٤ من الوحدة التي تليها يختلف عما يوجد في النشا. فبينما في النشا تتجه الروابط التساهمية الممتدة من ذرة الأكسجين الموصلة بين الوحدات إلى نحو مستوى الحلقات نجد في السيليلوز أن الرابطة إلى ذرة الكربون رقم ١ تتجة إلى

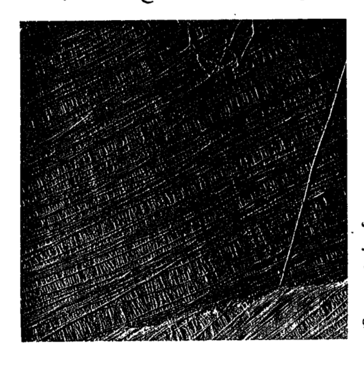
الشكل ٤-١٤. تركيب السيليلوز. قارن هذا التركيب بتركيب النشا في الشكل ٤-١١.

أسفل نحو مستوى الحلقة (الرابطة إلى ذرة الكربون رقم ٤ كما في النشا) . بالاضافة إلى ذلك لاتوجد سلاسل جانبية في السيليلوز كما في النشا. قد تبدو هذه اختلافات طفيفة ولكنها في الحقيقة تجعل السيليلوز مختلفاً جداً في خواصه عن النشاء بسبب إتجاه الروابط فإن حلقـات الجلوكوز تكون مرتبة على هيئة زجزاج في جزيئات السيليلوز (الشكل ٤-١٤) وهـذا ينتـج جزىء طويل متصلب. وغياب السلاسل الجانبية يسمح لهذه الجـزيئـات الخطية أن تتراص بالقرب من بعضها. وبفضل مجموعات OH- العديدة وذرات الأكسجين في الحلقة هناك العديد من الفرص لتكوين روابط هيدروجينية بين السلاسل المتجاورة وتكون النتيجة هي سلسلة من الليفات الطويلة المتصلة - هذه هي المادة المثلى لبناء الجدر التدعيمية للخلايا النباتية.

الشكل ٤-١٥ يبين صورة بالمجهر الاليكتروني لليفات السيليلوز من جدار خلية نباتية وهذه الليفات المستقيمة المتصلبة تعكس بوضوح طبيعة جزيئات السيليلوز التي تتكون منها.

٤-٤ . البروتينات PROTEINS

حوالي ٥٠٪ من الوزن الجاف للمادة الحية عبارة عن بروتين والبروتين ليس هو مادة التخزين البسيطة أو المادة النباتية مثل عديدات التسكر . فأنواع و وظائف البروتينات



الشكـل ٤-١٥. ليفـات السيليلوز في جدار خليـة أحـد الطحـالب الخضر. التكبير ١٧ ألف مرة.
(صـورة بالمجهـر الاليكـتروني بتصريح من ر. د. بريستون).

متباينة بقدر تباين وظائف الحياة نفسها. وكل العوامل الحفازة والتي تجعل التفاعلات الكيميائية للمادة الحية ممكنـة هي من الـبروتينـات . هـذه العوامـل الحفـازة تسمى الانزيمـات enzymes . والبروتينات هي أيضاً المواد المسؤلة عن حركة الكائنات الحية. فالعضلات مثلا تتكون أساسا من جزيئات بروتينية مرتبة بإتقان وتفاعلها مع بعضها يؤدي إلى ممارسة القوة العضلية. والبروتينات مسؤلة عن إنتقال مواد عديدة خلال الجهاز الـدورى. الهيموجلوبين الذي ينقل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الدم مثال مألـوف لذلك. تكوين جلطة في الدم يتطلب تفاعل عدد من البروتينات المختلفة. الأجسام المضادة antibodies تلك الجزيئات شديدة التباين والتي يمكنها أن تميز وتوقف عمـل أي مواد دخيلة قد تتسلل إلى الجسم هي بروتينـات. تعمل البروتينات أيضا كمستـودعـات غذائية. مثال ذلك بياض البيض والكازين وهو البروتين الرئيسي في اللبن. وعلىٰ حين أن السيليلوز هو المادة التركيبية الرئيسية في النباتات فان البروتين هو المادة التركيبية الرئيسية فـي الحيوانـات . الكولاجين collagen والالاستين elastin يمدان الانسجة الضامة مثل الجلد والأربطة بالقوة والمرونة أما الكيراتين keratin فهو البروتين الأساسي في الشعر والأظافر.

البروتينات جزيئات كبيرة فحتى أصغرها يبلغ وزنه الجزئي حوالي ٦٠٠٠ والبعض لها وزن جزيئي أكبر من مليون. وبالاضافة إلى الكربون والهيدروجين والأكسجين فان الـبروتينـات تحتـوي دائـما على ذرات نيتروجـين وعـادة ذرات كبريت كذلـك. البيتـالاكتـوجلـوبيـولـين Beta-lactoglobulin وهـو بروتـين مـوجـود فـي اللبـن لـه الصيغـة الجزيئيـة $C_{1642}H_{2652}O_{492}N_{420}S_{18}$ ووزنه الجزيئي هو ٣٦٦٨٤. وحينما نواجه بجزيء له مثل هذا الحجم فانه ليس لدينا أمل في كتابة صيغة تركيبية له.

لحسن الحظ فان كل البروتينات تتكون من واحد أو أكثر من البلمرات الخطية غير المتفرعة. و وحـدات هـذه البلمرات تسمى الأحماض الأمينية amino acids . يوجد عشرون حامض أميني في معظم البروتينات وتترابط هذه في سلاسل من ١٠٠ الى ٣٠٠ حامض أميني.

تركيب الأحماض الامينية STRUCTURE OF AMINO ACIDS

تبني الأحماض الأمينية العشرين تبعا لخطة مشتركة. ففي كل منها توجد ذرة كربون

(ذرة الكربـون الفـا the "alpha" carbon) وهي تتصل عن طريق روابط تساهمية بكل من :

١ ــ ذرة هيدروجين

٢ ــ مجموعة أمينو (NH_2 -)

٣ ــ مجموعة كربوكسيل (COOH -)

٤ ــ «شيء آخر» ـ هذا هو المجموعة "R"

ويتحدد الحامض الأميني (من بين العشرين) تبعا لطبيعة المجموعة R (الشكل ٤-١٦).

الوجود الدائم لمجموعة أمينو ومجموعة كربوكسيل (حامضية) يفسر الاسم أحماض أمينية. بسبب زوج الاليكـترونـات غير المقتسمــة فإن مجمــوعـة الأمينـو تكـون

الشكـل ٤-١٦. تركيب الاحمـاض الأمينية العشرين التي يتم تخليق البروتينات منها. الصف العلوي : أحماض أمينية فيها مجموعة R قطبية. مجموعات R يمكنها تكوين روابط هيدروجينية مع جزيئات الماء ولذلك فهذه الأحماض محبة للماء. الصف الأوسط : أحماض أمينية قاعدية (في اليسار) وحامضية (في اليمين). هـذه الأحمـاض محبة للمـاء بشـدة. الصف السفلي : أحماض أمينية بهـا مجموعة R غير قطبية وهذه كلها كارهة للماء.

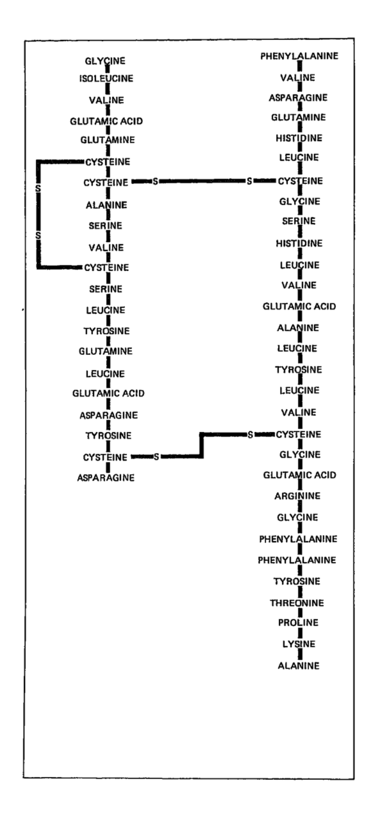
قاعديـة وهى تجذب البروتونات. وكما رأينا من قبل فان مجموعة الكربوكسيل تعطى بروتونات وهي لذلك حامضية وفي الواقع حينما تكون الأحماض الأمينية في محلول فان المجمـوعتين تتفاعلان معا. فتعطى مجموعة الكربوكسيل بروتونها إلى مجموعة الأمينو ويتكون أيون مزدوج الشحنة

$$
{}^{+}H_3N - \underset{\underset{R}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}} - COO^{-}
$$

الشكل ٤-١٦ يوضح تركيب الأحماض الأمينية العشرين. في أبسط حامض أميني وهـو الجـلايسين glycine تكون المجموعة R هيدروجين. في الألانين تكون مجموعة ميثيل($-CH_3$) أمـا في الفالين valine والليوسين leucine والأيزوليوسين isoleucine فان المجموعة R هيدروكربونية. هذه الأحماض الأمينية كلها كارهة للماء. وعلى العكس فان السيرين serine والثريـونيـن threonine بهما مجموعات هيدروكسيل كجزء من المجموعة R مما يجعلها محبة للماء.

بعـض الأحمـاض الأمينـية لـهـا مجموعـات R مشحونـة. فكـل من الليسـين lysine والأرجنين arginine والهيستيدين histidine به مجموعة أمينو كجزء من المجموعة R. في الـظروف العـادية داخل الخلية فان زوج الاليكترونات غير المقتسم على ذرة النتروجين في هذه المجموعات الأمينية يمسك ببروتون، لذا فان المجموعات الأمينية تحمل شحنة موجبة وهذه الشحنة تجعل الحامض الأميني محب للماء - أي قابل للتفاعل بسهـولة مع الجزيئات القطبية للماء. في كل من حامض الأسبارتيك aspartic acid وحامض الجلوتاميك glutamic acid توجد مجموعـة كربوكسيـل فـي المجموعة R. ومجمـوعـات الكـربوكسيل أيضا عادة تكـون مشحونة (أي انها تخلت عن بروتون) ولذلك تكون الجزيئات محبة للماء جداً.

السيستـايين cysteine وهو أحد الحامضين اللذين يحتويان على الكبريت يستحق ملاحظة خاصة. فحيثما يتقارب جزيئان منه فإنهما يتأكسدان (بفقد ذرتي هيـدروجين) ويترابـطان تسـاهميـا عبر الجسر "S-S" وبهـذه الـطريقة يمكن الترابط تساهميا بين سلسلتين من الأحماض الأمينية (تسمى عديدة الببيتيد) كما في الشكل ٤-١٧ أو يمكن رسم السلسلة على هيئة حلقة.



الشكل ٤-١٧ . تتابع الأحـماض الأمينيـة في جزىء الأنســولـين. يتكـون الجـزىء من سلسلتين عديدتي الببتيد مرتبـطتـان معـا بواسطة جســرين مـن ثنائي الكبريتيد.

النظائر الضوئية *OPTICAL ISOMERS*

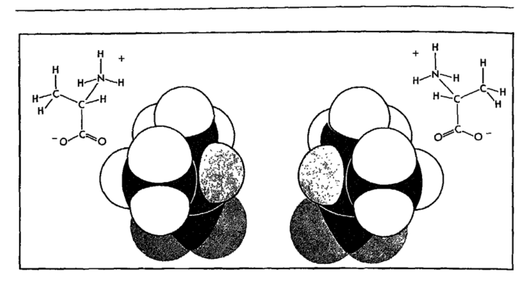
تتـذكـر أن الروابط التساهمية الأربع لذرة الكربون تتجة نحو قمم شكل هرمي رباعي منتظم وبذلك تكون موزعة في ٣ أبعاد في الفراغ بزاوية حوالي ١٠٩,٥° بينها. والآن دعنا نعيد النظر في تركيب الجلايسين على ضوء هذه الحقيقة. وبالطبع يمكننا كتابة صيغ تركيبية ذات بعدين للجلايسين بعدة طرق منها مثلا مايأتي:

$$\begin{array}{c} H \\ | \\ H-C-COOH, \\ | \\ NH_2 \end{array} \qquad \begin{array}{c} NH_2 \\ | \\ H-C-COOH, \\ | \\ H \end{array}$$

$$\begin{array}{c} H \\ | \\ H_2N-C-COOH, \text{ etc.} \\ | \\ H \end{array}$$

ولكن هذه الاختـلافات ليست واقعية في ثلاثة أبعاد. واذا بنينا نماذج ثلاثية الأبعاد للجلايسين فإننا نجد أنه مهما كان عددها ومهما كانت طريقة إمساكنا بها فإنها جميعاً تكون متطابقة لذا ليس هناك إلا طريقة واحدة لبناء جزيء جلايسين. ولكن ليس هذا هو الحال مع الألانين فعندما نبدأ في بناء نماذج ثلاثية الأبعاد للألانين نجد أنه يمكننا تخليق شكلين متميزين (الشكـل ٤-١٨). إذا واجهنا الجزيء بحيث تشير مجموعة الكربوكسيل نحونا ومجموعة الأمينو بعيداً عنا فإن مجموعة R يمكن وضعها إما بحيث تبرز لأعلى والى اليسار وذرة الهيدروجين لأعلى والى اليمين أو بالعكس تماما.

وعـلى خلاف الموقف مع الجلايسين هذان الشكلان لايمكن أن يتطابقا بل إنهما صورتـان في المـرآة لبعضهـما البعض أو هما يشبهان زوجاً من القفازات . مثل هذه الجزيئات تسمى بالنظائر الضوئية حيث يشير هذا الاسم إلى الخاصية التي تجمع بينهم جميعاً من حيث إلتفاف مستوى إستقطاب الضوء الذي يمر خلالهم. فاذا كان أحد الشكلين يلف الضـوء في إتجاه عقارب الساعة فان نظيره الضوئي يلفه في إتجاه ضد عقارب الساعة.



الشكل ٤-١٨ . النظيران الضوئيان للحامض ألانين D, L . النظائرالضوئية من النوع L فقط هي التي توجد في البروتينات .

كلما كانت ذرة الكربون مترابطة مع أربعة أشياء مختلفة فانه يمكنها تكوين زوج من النظائر الضوئية وقد إصطلح على تسمية أحدهما بالشكل -L والآخر بالشكل -D . ولك أن تسأل إذا ما كان استعمال أحدهما هاماً للحياة. والاجابة بكل تأكيد نعم. فجميع الأحماض الأمينية الموجودة في البروتينات في جميع المخلوقات على هذا الكوكب من الشكل -L . وسوف تموت جوعاً إذا حاولت تلبية إحتياجاتها من الأحماض الأمينية من الشكل -D . وبعبارة أخرى فان التوزيع الفعلي للذرات في ثلاثة أبعاد له أهمية قصوى في العديد من العمليات الحيوية.

التناظر الضوئي ليس مقصوراً فقط على الأحماض الأمينية فاذا عدت مرة أخرى إلى الصيغ التركيبية للسكرات (الشكل ٤-٩) ستجد ذرات كربون عديدة لها أربعة مجموعات إحلال مختلفة. وبذلك فان كل واحدة من ذرات الكربون هذه يمكنها ترتيب مجموعات الاحلال حولها في أحد شكلين متناظرين وهنا أيضا فان للكائنات الحية أفضليات محددة لأحد النظائر دون الآخرين.

تركيب عديدات الببتيد STRUCTURE OF POLYPEPTIDES

تتحد الأحماض الأمينية مع بعضها لتكوين عديدات الببتيد كما هو موضح بالشكل ٤-١٩ . وعلى الرغم من أن عملية البلمرة الفعلية أعقد مما يتضح من هذا الشكل إلا

أن النتيجة هي إستبعاد جزيء ماء من بين كل زوج من الأحماض الأمينية. والرابطة بين الأحماض الأمينية (أو بالاصح رواسب الأحماض الأمينية) تسمى الرابطة الببتيدية .peptide bond

$$-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-\underset{\underset{\displaystyle H}{|}}{N}-$$

عند إحدى نهايات عديد الببتيد توجد مجموعة أمينو مكشوفة وتسمى هذه النهاية بنهـاية الأمينـو أو النهـاية -N لعديد الببتيد. أما النهاية الأخرى بما فيها من مجموعة كربوكسيل مكشوفة فتسمى نهاية الكربوكسيل أو النهاية -C

$$H_3N^+-\underset{R_1}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-H \quad H-\underset{H}{\overset{H}{N^+}}-\underset{R_2}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-H \quad H-\underset{H}{\overset{H}{N^+}}-\underset{R_3}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O^-$$

$$\downarrow H_2O \qquad \downarrow H_2O$$

$$H_3N^+-\underset{R_1}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-\underset{H}{N}-\underset{R_2}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-\underset{H}{N}-\underset{R_3}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O^-$$

رابطة ببتيديه رابطة ببتيديه

«أ»

$$H_3N^+-\underset{R_1}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-\underset{H}{N}-\underset{R_2}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-\underset{H}{N}-\underset{R_3}{\overset{H}{C}}-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O^- \longrightarrow$$ خليط من أحماض أمينية

$$\uparrow H_2O \qquad \uparrow H_2O$$

«ب»

الشكل ٤-١٩. (أ) ترتيب ثلاثي الببتيد. (ب) تميوء ثلاثي الببتيد. الخطوات الفعلية التي يتم بها تخليق ثلاثيات الببتيد في الخلايا أكثر تعقيدا من مجرد نزع جزيء ماء كما هو موضح هنا.

وعديدات الببتيد أيضا يمكن تفكيكها وذلك يحدث بواسطة التميؤ. بمعاونة أحد الانزيمات البروتيوليتية proteolytic enzymes (البروتييز) يمكن إضافة جزيء ماء إلى الرابطة الببتيدية وكسر السلسلة عند هذه النقطة. في الانسان يتطلب هضم (تميؤ) البروتين نشاط عدة أنواع من الانزيمات البروتيوليتية كل منها قادر على كسر الروابط الببتيدية بين أزواج معينة من الأحماض الأمينية وليس سواها.

التركيب الابتدائي *PRIMARY STRUCTURE*

واحد من أهم إنجازات الكيمياء الحديثة هو تطوير وسائل لتحديد التتابع الذي توجد به الأحماض الأمينية في عديدات الببتيد بدقة. وحينما يتم ذلك فقط فانه يمكن كتابة الصيغة التركيبية للبروتين. وأول بروتين أمكن تحديد تتابع الأحماض الأمينية فيه كان الانسـولـين (الشكـل ٤-١٧). هذا الهـورمـون الهـام صغير بالمقارنة بغيرة من البروتينات وصيغته الجزيئية هـي $C_{254}H_{377}N_{65}O_{75}S_6$.ومع ذلك فقد إستغرق تحديد التتـابـع الـدقيق للأحماض الأمينية والجسور (S-S) بين جزيئات السيستايين في هذا الـبروتين عشرة أعوام (١٩٤٤ - ١٩٥٤) من الدكتور فريدريك سانجر وزملائة في جامعـة كامـبردج بأنجلترا . هذا البروتين يتكون من سلسلتين من عديدات الببتيد متـماسكتـين معاً بواسطة جسور ثنائي الكبريتيد ويبلغ مجموع الأحماض الأمينية ٥١ (الشكل ٤-١٧).

وقـد تطورت بسرعـة وسـائل تحديد التتابع في البروتينات منذ أيام العمل الرائد لسانجر وفي الواقع فأنه يمكن الآن أداء معظم العمل آلياً بواسطة الأجهزة. نتيجة لذلك فان تتابع الأحماض الأمينية صار معروفا الآن لعدد كبير من البروتينات. ويعرف تتـابـع الأحمـاض الأمينية في البروتين وكذلك أماكن أي جسور من ثنائي الكبريتيد بالتركيب الابتدائي للبروتين.

من البروتينات التي تلت ذلك في معرفة التركيب الابتدائي الليسوزيم. والليسوزيم عبـارة عن إنزيم موجود في بياض البيض والدموع وافرازات أخرى وهو مسئول عن تحليل عديدات التسكر في جدر العديد من البكتريا وبذلك يقدم قدرا من الحماية ضد العدوي.

الـتركيب الابتدائي لليسوزيم الموجود في بياض البيض هو سلسلة عديدة الببتيد مفردة يحتوي على ١٢٩ حامض أميني وبه أربع أزواج من السيستايين تنشىء جسور تساهمية بين المواقع ٦ مع ١٢٧ و ٣٠ مع ١١٥ و ٦٤ مع ٨٠ و ٧٦ مع ٩٤ (الشكل ٤-٢٠) . وجود هذه الجسور يدلنا فوراً على أنه لايمكن تمثيل عديد الببتيد هذا بسلسلة مستقيمة متصلبة (كما في حالة السيليلوز مثلا) فلابد للسلسلة أن تنطوي على نفسها لكى تسمح لجزيئات السيستايين بالتقارب من بعضها .

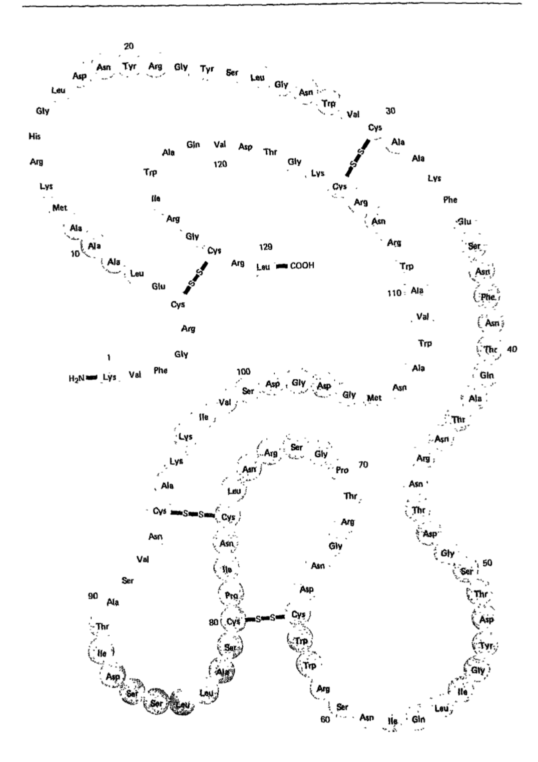
التركيب الثانوي *SECONDARY STRUCTURE*

لكى نعرف المزيد عن الشكل الحقيقي للجزيء في الفراغ ثلاثى الأبعاد لابد لنا من التحـول إلى طريقة تحليلية أخرى وهي التشتت البللوري للأشعة السينية . تتكون البللورة من تجمع منظم من الأيونات (الشكل ٣-١٤ في الباب السابق) أو الجزيئات . فاذا مرت حزمة من الأشعة السينية سوف تنعكس بفعل الذرات في البللورة . وبفضل الـترتيب المنـظم للذرات فان الانعكـاس سوف يكـون منظماً أيضا . وبدراسة نمط الانعكاسات الناجمة عن سقوط الحزمة على البللورة من زوايا مختلفة فانه من الممكن (خاصة مع إستعمال حاسب آلى) تكوين صورة عن ترتيب الذرات في تلك البللورة .

من أوائل البروتينات التي تم تحليلها بهذه الطريقة بعض البروتينات التركيبية مثل الفاكيراتينـات ∝ -keratins الموجودة في الصوف والفبروين fibroin وهو البروتين الذي تفرزة دودة الحرير . وكان إختيار هذه البروتينات موفقا بسبب تركيبها البالغ الانتظام والذي يكرر نفسه .

أسفر تحليل الالفاكيراتينات بالأشعة السينية عن عدة حقائق مثيرة . فقد تبين أن الروابط الببتيدية نفسها متصلبة جداً و أن جميع ذراتها تقع في مستوى واحد و الفرصة الوحيدة لاكتساب بعض المرونة في عديد الببتيد توجد عند روابط ذرة الكربون الفا . أي ذرة الكربون التي تحمل المجموعة R. في الالفاكيراتينات تستغل هذه المرونة لتكوين إلتفاف حلزوني في سلسلة عديد الببتيد (الشكل ٤-٢١) ولابد من ذكر عدة ملامح هامة لهذا الحلزون :

(١) جميع المجموعات R الخاصة بالأحماض الأمينية تمتد نحو الخارج . (٢) يلتف الحلزون لفة كاملة كل ٣,٦ رواسب . (٣) إتجاة الالتفاف في الحلزون يميني أي أنه



الشكل ٤-٢٠ . التركيب الابتدائي لليسوزيم . يتكون الجزيء من سلسلة مفردة عديدة البيتيد بها ١٢٩ راسب من الأحماض الأمينية . يوجد كذلك ٤ جسور من ثنائي الكبريتيد بين أجزاء السلسلة .

الشكل ٤-٢١ . الحلزون ألفا - شكل شائع للتركيب الثـانـوي. هذا الحلزون اليميني يكمل دورة كاملة كل ٣,٦ راسب. لاحظ الرابطة الهيدروجينية التي تنشأ بين مجـموعـة C = O في كل رابـطة ببتيدية ومجموعة N-H- الرابعة التي توجد أسفلها على الحلزون.

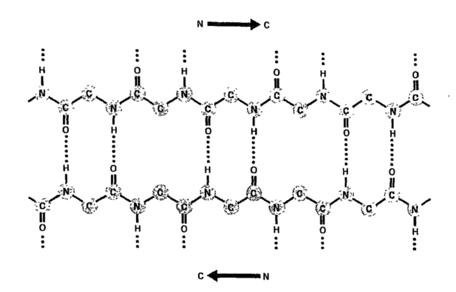
عنـدما يستقر فإنه يلتف في إتجـاة عقارب الساعة. (٤) المجموعة C = O- في كل رابـطة ببتيدية تمتـد موازية لمحور الحلزون وتشـير مبـاشرة إلى مجـمـوعـة NH- الخاصة بمجموعة الببتيد التي تقع على بعد أربعة أحماض أمينية أسفلها على الحلزون. وكلا من ذرات الأكسجـين والنـتروجـين عالية السـالبية الكهربية وعلى ذلك تنشأ روابط هيدروجينيـة بيـن هـذه المجموعـات : ــ C = O.....H-N- وهـــذا الــترتيب الـدقيق الثـلاثى الأبعـاد للأحماض في الفاكيراتين عديـد الببتـيد يسمـى الحلـزون ألفـــا alpha helix (الشكل ٤-٢١) . وهو مثـال للتركيب الثانوي secondary structure لبروتـــين.

والذي يجعل الحلزون ألفا ممكنا هو كثرة عدد الـروابط الهيدروجينية . ولكل رابطة هيدروجينية طاقة رابطة تقدر بخمسة كيلو سعر وهو كسر بسيط من طاقة رابطة تساهمية (حوالي ١٠٠ كيلو سعر) ولكن وجود رابطة هيدروجينية بين كل حامض أميني والحامض الأميني الذي يبعد عنه بأربعة أحماض أمينية يقدم من طاقة الروابط الاجمالية مايكفي لجعل الحلزون ألفا تركيب مستقر جداً .

ومع ذلك فأنه يمكن من خلال كسر الروابط الهيدروجينية الموجودة بين السلاسل أن يتمدد الحلزون وفي الواقع فإن ألياف الصوف يمكن أن تتمدد حتى يتضاعف طولها مرتين بفضل الخواص الجزيئية للحلزون ألفا.

الفبريون هو البروتين الذي تستعملة دودة الحرير في نسج خيوط الشرنقة وقد تم تحليله بالأشعة السينية. في الفبروين تكون سلاسل عديدات الببتيد متعددة (الشكل ٤-٢٢). يترتب عدد من السـلاسـل في صفـوف متـوازية وتتماسك بواسطة روابط هيدروجينية تنشأ بين مجموعات N-H, -C = O- من إحدى السلاسل مع مجمـوعـات N-H, -C = O- من السلسلة المجاورة (الشكل ٤-٢٢). في الحرير يفضل أن توصف السـلاسـل بأنها متعـاكسـة الاتجـاه antiparallel لأن السـلاسل المتجـاورة تجرى في إتجاهات متضادة أي من النهاية N إلى النهاية C وبالعكس. حينما تتراص طائفة من هذه السلاسل متضادة الاتجـاه إلـى جـوار بعضـهـا فأنهـا تكون مايعرف باللوحـة ذات الطبقات بيتا beta-pleated sheet' وهي مثال هام وشائع للتركيب الثانوي للبروتينات.

ولأن السلاسل ممددة عن آخرها فأنه لايمكن تمديدهم أكثر من ذلك بدون كسر بعض الـروابط التساهمية ولهذا السبب كان الحرير غير قابل للتمدد. ومع ذلك فان طبقـات اللوحـة ذات الطبقات بيتا التي تتكون منها الياف الحرير تجعله مرناً جداً. الحلزون ألفا واللوحة ذات الطبقات بيتا من أكثر أمثلة التركيب الثانوي إنتشاراً ولكن هنـاك أمثلة أخـرى للترتيب المنـظم للأحماض الأمينية في عديدات الببتيد. وحينما لايمكن ملاحـظة نمط محدد في أحـد أجـزاء سلسلة عديد الببتيد يقال أن التركيب الثانوي لها به ملف عشوائي. وفي الحقيقة فأنه من المشكوك فيه جداً أن يوصف الترتيب ثلاثى الأبعـاد لأي عديد ببتيد بأنـه عشوائي فكل هذه الأمثلة هي إنعكاس مباشر لأحماض أمينية معينة وترتيبها المستعمل في تخليق عديد الببتيد. سلاسل الفبروين مثلا تتكون أساساً من رواسب جلايسين (محب للماء) متبادلة مع رواسب ألانين (كارهة للماء) وهذا يسمح للسلاسل بالأستقرار على مقربة من بعضها في ترتيب اللوحة ذات الطبقات بيتا. وعلى الجانب الآخر فأن سلسلة تحتوي على رواسب الألانين سوف تتخذ شكـل الحلزون ألفا تلقائياً بحيث تكون مجموعات CH_3 من جزيئات الألانين بارزة للخارج من الحلزون.



الشكــل ٤-٢٢. اللوحـة ذات الـطبقـة بيتـا - مثـال شائع آخر للتركيب الثانوي. تترابط السلاسل المتوازية مع بعضها بواسطة الروابط الهيدروجينية التي تنشأ بينها.

التركيب الثلاثى والرباعي TERTIARY AND QUATERNARY STRUCTURE

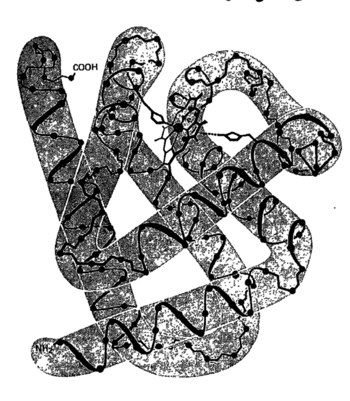
الألفـا كيراتينات والفبروين أمثلة للبروتينات الليفية. والألياف البروتينية هامة لما تكسبه من خواص ميكانيكية لتلك التراكيب مثل الجلد والقرون والشعر وما الى ذلك كما تلعب دورا هاماً في آلية إنقباض العضلات. وفي كل هذه الحالات تكون البروتينات غير قابلة للذوبان في الماء. ولكن العديد من البروتينات (مثل الانزيمات وبروتينات النقل) لايمكن أن تؤدى وظائفها الا اذا كانت ذائبة في الماء. مثل هذة البروتينات تميل إلى أن تكون كروية أي أن سلسلة عديد الببتيد تكون ملتفة على نفسها كثيرا لتكون جزء مضغوط وهذا يجعل التحليل بالأشعة السينية صعبا ولكنه يكون ممكنا أذا أمكن بلورة البروتين وهو ما يحدث مع الكثير منهم لحسن الحظ. من أوائل البروتينات الكروية التي أمكن تحديد تركيبها ثلاثى الأبعاد هو الميـوجلوبين myoglobin.

الميوجلوبين هو عبارة عن بروتين أحمر يوجد في العضلات ويتحد مع الأكسجين وهو المسئـول عن لون اللحم النيء. الميوجلوبين الموجود في عضلات الحوت يتكون من سلسلة مفردة بها ١٥٣ حامض أمينى مرتبة في ثمان مناطق من الحلزون الفا. عند نهاية

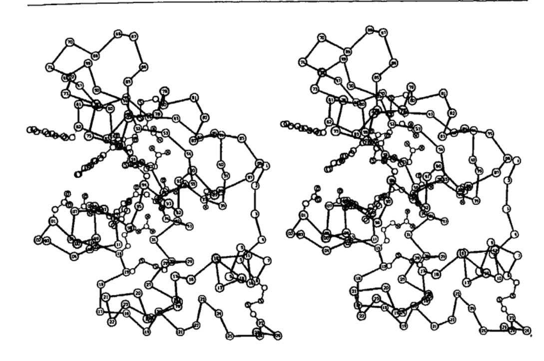
كل قطعـة من الحلزون فأن السلسلة تأخـذ انحنـاءاً حاداً ثم تبدأ قطعة أخرى من الحلزون (الشكل ٤-٢٣) والنتيجة النهائية هي تركيب كروى. والهيئة الأجمالية للبروتين الكروى تسمى التركيب الثلاثى tertiary structure.

يختلف الميوجلوبـين من ناحية أخرى عن البروتينات الأخرى التي ناقشناها حتى الآن، فالأنسولين والليسوزيم والفبروين كلها بروتينات بسيطة من حيث أنها تتكون من سلاسل عديدة الببتيد فقط. وعلى خلاف ذلك فأن الميوجلوبين بروتين مصاحب con-jugated protein يتصـل بسلسلة عديد الببتيد أربع حلقات مترابطة في حلقـة عامة يوجد في مركزها ذرة حديد (Fe). هذا التركيب (الشكل ٤-٢٣) يسمى مجموعة الهيم heme group وهـو المكـان من الجـزيء الـذي يتحـد معه الأكسجيـن . مجموعـة الهيم هي مثال للمجموعة الفعالة prosthetic group التي هى سمة من سمات جميع البروتينات المصاحبـة.

تتـابع الأحماض الأمينية في جزيء الميوجلوبين يكون بحيث تقع الأحماض ذات المجموعات R المحبـة للماء في مواضع بارزة خارج الجزيء ولذلك يمكن للميوجلوبين أن يوجد محاطا بالماء. ومن ناحية أخرى تكـون المجموعات R الكارهة للماء متجهة نحو داخل الجزيء وبذلك يستبعد الماء من داخل الجزيء.



الـشـكـل ٤-٢٣. رسـم تخطيـطي للتركيـب الـثـلاثي للميـوجلوبـين. يتكون الجزيء من ثمان قطع من الحلزون ألفا ملتـوية لتكوين تركيب كروى. يمكن لجزيء أكسجين أن يترابط مع المجموعة الفعالة أي مجموعة الهيم (نـظام الحلقـات عند قمة الوسط). بتصريح من ر. أ. ديكرسون)



الشكـل ٤-٢٤. منظر مجسم لجزيء الليسـوزيم. أسهل طريقة لدمج الصور المجسمة هي إستعمال منظار مجسم ولكن بقليل من الممارسة فان أغلب الناس يمكنهم أداء الدمج كالاتي:
ضع لوحة من الورق المقوي قائمة بين المنظرين بحيث ترى العين اليسرى الصورة اليسرى فقط وترى العين اليمني الصورة اليمني فقط ويساعد في ذلك توزيع الاضاءة بالتساوي بين الصورتين وأن تكون عيناك على بعد ١٨ بوصة تقريبا. وبالمزيد من الممارسة فقد تجد أنك تستطيع دمج الصور بدون أي وسائل مساعدة.
(بتصريح من ايرفنج جايس).

الـتركيب الـربـاعى لليسوزيم أمكن أيضـاً التوصل اليه. ويوضح الشكل (٤ - ٢٤) العمود الفقرى للسلسلة المكونة من ١٢٩ حامض أمينى. في الواقع يبين الشكل منظرين مختلفين قليلا. فإذا فحصتهما من خلال منظار مجسم يمكنك دمج الصورتين معا في منظر ثلاثى الأبعاد للجزيء. وعلى أى حال إبحث عن النهايات C والنهايات N للجزيء وكذلك عن جسور ثنائى الكبريتيد الأربعة. بمعاونة المنظار المجسم يمكنك أن تحدد أماكن ثلاثة حلزونات ألفا قصيرة. هذة تقـع عنـد الرواسب ٥-١٥، ٢٤-٣٤، ٨٨-٩٦. وفي الليسوزيم توجد منطقة واحـدة من ذات الـطبقـات بيتـا حيث تكون الرواسب ٤١-٤٥ في اتجاه بينها الرواسب ٥٠-٥٤ في الاتجاه الآخر (الشكل ٤-٢٤).

هناك سمتان أخريان تجدر ملاحظتهما في الليسوزيم. فإذا كان لديك الصبر للتحقق من شخصية الـرواسب المرقمة في المنظر المجسم فإنك ستجد (كما في الميوجلوبين) أن

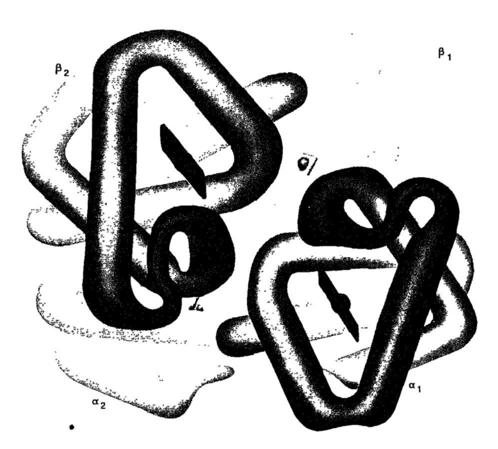
الرواسب الواقعة عند سطح الجزيء تميل إلى أن تكون محبة للماء، بينما تكون الرواسب الواقعة بالداخل غالبا كارهة للماء. وكما سنرى في الباب ٦ فإنه في هذا المكان يتم مؤقتا تقييد عديد التسكر الذي يؤثر عليه الليسوزيم حتى يكتمل النشاط الانزيمي.

المناظر المجسمة في الشكل (٤-٢٤) تبين فقط مسار العمود الفقري لسلسلة عديد الببتيد. ويمكننا مشاهدة التنظيم العام للجزىء فقط عندما نتخلص من معظم المجموعات R وكذلك ذرات الروابط الببتيدية. ولكن في الواقع فأن الجزىء ليس له هذا التركيب الفارغ الذي يشبه القفص الموضح في الشكل ٤-٢٤. وعند إضافة كل الذرات يصبح داخل الجزىء ممتلئا عن آخرة. والشكل ٤-٢٥ يبين نموذج ممتلىء الفراغ لليسوزيم. والتراص المتزاحم للذرات هو أحد السمات العامة للبروتينات الكروية globular proteins.

الهيموجلوبين هو بروتين كروي مقيِّد للأكسجين ويوجد في الدم ولونة الأحمر هو سبب لون الدم كما أنه هو المسئول عن نقل الأكسجين من الرئتين (أو الخياشيم) إلى كل أنسجة الجسم. كل جزىء هيموجلوبين يتكون من ٤ سلاسل عديدة الببتيد (الشكل ٤-٢٦). إثنتان من هذه السلاسل هما السلسلتان ألفا متماثلتان تماما وبكل منهما ١٤١ حامض أميني. السلسلتان الباقيتان هما سلسلتا بيتا متماثلتان أيضا وبكل



الشكل ٤-٢٥. نموذج ممتلىء الفراغ لليسوزيم. الشق الموجود عند الركن العلوي الأيسر هو مكان إرتباط المادة التي يؤثر فيها هذا الانزيم (النموذج من د. جون أ. ريبلي - بتصريح من إيرفنج جايس).



الشكل ٤-٢٦ . تركيب الهيموجلوبين. يتكون الجزيء من ٤ سلاسل : سلسلتان ألفا وسلسلتان بيتا. كل سلسلة تحمل مجموعة هيم يتحد معها جزيء أكسجين. تجمع بروتين من عدة وحدات منفصلة هو مثال للتركيب الرباعي. (بتصريح من إيرفنج جايس).

منها ١٤٦ حامض أميني. تحيط كل سلسلة ألفا وكل سلسلة بيتا بمجموعة هيم كارهة للماء والجزيء ككل يشبه ٤ جزيئات من الميوجلوبين مع بعضهم وكما في حالة الميوجلوبين فأن مجموعات الهيم هي الأماكن التي يتم فيها تقييد جزيئات الأكسجين وعلى ذلك فأن كل جزيء هيموجلوبين يستطيع أن يقيد ٤ جزيئات أكسجين.

السلاسل الأربعة عديدة الببتيد في الهيموجلوبين لاتتماسك مع بعضها بواسطة جسور S-S أو أي نوع من الروابط التساهمية. وبدلا عن ذلك فإن القوى الضعيفة العديدة بما في ذلك الروابط الهيدروجينية تحفظ السلاسل الأربعة معاً. وجود وحدات متميزة في جزيء بروتين كما في حالة السلاسل الأربعة للهيموجلوبين يرفعه إلى مستوى أعلى من التنظيم يعرف بالتركيب الرباعي quaternary structure.

تركيب ووظيفة البروتين : بعض العلاقات

PROTEIN STRUCTURE AND FUNCTION : SOME RELATIONSHIPS

الـوظيفـة التي يؤديها البروتين (إلا عندما يكون غذاء) تعتمد بصورة مطلقة على التركيب ثلاثى الأبعاد لهذا البروتين. ومن الممكن أن يتعرض البروتين لمادة أو أكثر تخل بتركيبـه الثـانوي والثلاثى والرباعي. فالتركيز العالي من الأيونات مثلا سوف يكسر الـروابط الهيدروجينية والعـوامـل المختـزلـة سوف تكسر جسـور S-S بين جزيئـات السستـايين. وعلى الرغم من أن كل هذه العوامل لاتكسر أي من الروابط الببتيدية وبذلك لاتؤثر على التركيب الأبتدائي للبروتين إلا أن هذه المعالجات تحطم الخواص الوظيفية للبروتين ويصبح البروتين فاقداً لطبيعته. إذا فقد الليسوزيم طبيعته ببطء على سبيل المثال فإنه سيفقد قدرته على مهاجمة عديد التسكرالذي يعمل عليه في الأحوال العـادية. وأي إنـزيم يفقـد طبيعته يتوقف عن أداء وظيفته. وعندما تفقد الأجسام المضادة طبيعتها تصبح غير قادرة على التمييز والتعامل مع الأجسام الغريبة (antigens)

ولكن إذا كانت الوظيفة تعتمد على التركيب فعلام يعتمد تركيب (التنظيم ثلاثى الأبعـاد) الـبروتـين؟ والأجـابة بالتأكيد هي : التركيب الأبتدائي أي التتابع الدقيق للأحمـاض الأمينية في الـبروتين. كيف عرفنا ذلك؟ إذا أعدنا الليسوزيم الذي فقد طبيعته إلى الأس الهيدروجيني المعتاد وتركيز الأملاح وما إلى ذلك فانه سوف يستعيد تركيبه الثانوي والثلاثى المميز ، سوف يظهر ذلك على هيئة إستعادة خصائصه الحفازة.

إذا كان التركيب الثانوي والثلاثى للبروتين يعتمد فقط على التتابع الدقيق للأحماض الأمينية فهل يظل التحليل بالأشعة السينية ضروريا؟ إذا كان تتابع معين للأحماض الأمـينـية (على سبـيل المثـــال ألانـين ـ جلايسـين ـ ألانيـن) يتخــد دائمـا نفس التوجه في الفراغ ألا يمكننا التنبؤ بالشكل العام للبروتين من مجرد معرفة تتابع الأحماض الأمينية فيه؟ التوجه الذي يتخذه الحامض الأميني يتأثر بالراسب الذي يسبقه والراسب الذي يليه. ومن الناحية النظرية فأنه لابد أن نستطيع تحديد الزاوية التي يتخذها أي من الأحماض الأمينية العشرين عندما يسبقه ويليه أي من هذه الأحماض العشرين وهذا يتطلب أن ندرس ٨٠٠٠ توليفة محتملة لذلك. وفي الواقع فأن لدينا الآن معلومات عن نحو ألف من هذه التوليفات المحتملة وهناك محاولات لاستعمال هذه المعلومات (أحيانا

بمساعدة الحاسب الآلى) لتحديد التركيب الثانوي والتركيب الثلاثى . وحينها يكون ذلـك معـروفا من التحليل بالأشعة السينية فقد أدت الطريقتان إلى نتائج متشابهة بصورة مذهلة .

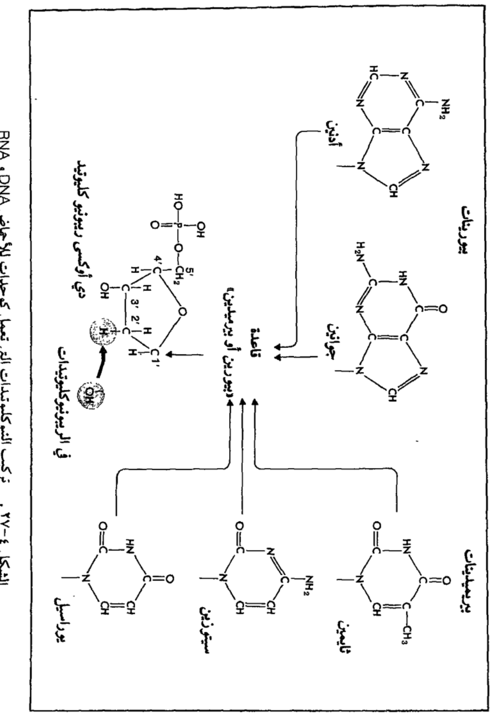
إذا كان عمل البروتين يعتمد على شكله واذا كان شكله يعتمد على تركيبه الابتدائي فما الذي يحدد تتابع الأحماض الأمينية في سلاسلة؟ الإجابة على هذا السؤال تمثل واحداً من أعظم الإنتصارات العلمية في القرن العشرين. الإجابة هي : الترتيب الدقيق للأحماض الأمينية في بروتيـن يتقرر بواسطة الشفرة الوراثية genetic code. في البابين ١٢ و ١٣ سندرس طبيعة هذه الشفرة الوراثية وكيف تحكم تركيب البروتينات . أما الأن فيكفى أن نقـول أن الشفـرة الوراثية موجودة ويتم التعبير عنها بواسطة مجموعة أخرى من الجزيئات الكبيرة موجودة في جميع الخلايا ألا وهي الأحماض النووية .

٤-٥ . الأحماض النووية NUCLEIC ACIDS

يوجـد في الكـائنات الحية نوعان من الأحماض النووية وهما : حامض دى أكسي ريبونيوكلييك أو DNA وحامض ريبونيوكلييك أو RNA وكلا منهما عبارة عن بولمر خطى غير متفـرع . الأوزان الجـزيئية تتراوح ما بين ٢٥٠٠٠ وخمسـين بليون. ومثـل كل البلمـرات فأنـه يمكن تكسير الأحماض النووية إلى وحداتها وهذه الوحدات تسمى نيوكليوتيدات nucleotides وهي تتكون من ثلاثة أجزاء :

١ ــ سكـر بـه خمـس ذرات كربـون (أي سكـر خماسـي pentose) ومنه نوعان : الرايبوز ribose الذي توجد به مجموعة هيدروكسيل على ذرة الكربون رقم ٢ (ويرمز لها بالرقم ٢) والـدي أكسـي ريبـوز deoxyribose والذي توجد به ذرة هيدروجـين في نفس المكـان (الشكل ٤-٢٧). النيوكليوتيدات المحتوية على الـريبـوز (ريبـونـيوكليوتيـدات) هـي وحـدات RNA أمـا الـدي أوكسي ريبونيوكليوتيدات فهي وحدات DNA .

٢ ــ تـركيب حلقـي يحتوي علـى النتروجين ويسمى القاعدة base (وهي قواعد بسبب زوج الاليكـترونـات غير المقتسم على ذرات النـتروجـين التي يمكنهـا إكتسـاب بروتونات). تتصل القاعدة بذرة كربون رقم ١ في السكر الخماسي، إثنتان من هذه القواعد هـما الأدنيـن adenine والجوانين guanine لهما تركيب مزدوج الحلقة



الشكل ٤-٢٧ . تركيب النيوكليوتيدات التي تعمل كوحدات للأحماض DNA و RNA

وتسمى البيورينات . الاثنتان الباقيتان وهما الثايمين thymine والسيتوزين cytosine لهما تركيب أحادي الحلقة وتسمى البيريميدينات pyrimidines وللسهولة سوف نرمز لهذه القواعد بالحروف C. T. G. A. على التوالي. القواعد في RNA أساسا هي الأدنين (A) والسيتوزين (C) والجوانين (G) و البيريميدين يوراسيل uracil (U) ولا يوجد ثايمين في RNA . وأتحاد القاعدة مع السكر يسمى نيوكليوسايد nucleoside .

٣ ـ مجموعة أو مجموعتان أو ثلاث مجموعات من الفوسفات وهي تتصل بذرة الكربون رقم ٥ من السكر الخماسي .

كلا من الحامضين DNA و RNA يتكون من ثلاثى فوسفات النيوكليوسيد . بالنسبة للحامض RNA هذه هي *ATP* (Adenosine TriPhosphate) و CTP و GTP و UTP. المكافئات دي أوكسي (يرمز لها بالحروف dATP و dCTP وdGTP و dTTP) هي التي تشارك في تخليق الحامض DNA (الشكل ٤-٢٨). ويتصل كل نيوكليوتيد بالجزىء المتنامي عند ذرة الكربون رقم ٣ للسكر الخماسي وحينما يتم هذا الاتصال فإن مجموعتي الفوسفات الثانية والثالثة تُستبعدان (الشكل ٤-٢٩). ولذلك يكون لكل خيط من الحامض DNA والحامض RNA «إتجاه» وتماما كما هي الحال مع البروتينات حيث يتجمع الجزيء من النهاية N إلى النهاية C فإن بلمرات DNA و RNA تتجمع وتُقرأ إصطلاحياً في الاتجاة من ذرة الكربون رقم ٥ إلى ذرة الكربون رقم ٣ . وعلى ذلك فأن جزىء الحامض DNA الذي له التتابع 5 ATCCGTG 3 ليس هو نفس الجزىء الذي له التتابع 5 GTGCCTA 3

	قاعدة	نيوكليو سايد	نيو كليوتيدات		
		سكر خماسي + قاعدة	أحادي الفوسفات	ثنائي الفوسفات	ثلاثي الفوسفات
RNA	Adenine (A)	Adenosine	AMP	ADP	ATP
	Guanine (G)	Guanosine	GMP	GDP	GTP
	Cytosine (C)	Cytidine	CMP	CDP	CTP
	Uracil (U)	Uridine	UMP	UDP	UTP
DNA	Adenine (A)	Deoxyadenosine	dAMP	dADP	dATP
	Guanine (G)	Deoxyguanosine	dGMP	dGDP	dGTP
	Cytosine (C)	Deoxycytidine	dCMP	dCDP	dCTP
	Thymine (T)	Deoxythymidine	dTMP	dTDP	dTTP

الشكل ٤-٢٨ . نظام تسمية النيوكليوسيدات ومشتقاتها أحادي وثنائي وثلاثي الفوسفات .

الشكـل ٤-٢٩ . بلمرة الحامض DNA. تنمو السلسلة باضافة كل نيوكليوتيدة الى ذرة الكربون رقم ٣ الحرة في السكر الخماسي. بلمرة الحامـض RNA تتم بنفس الطريقة إلا أن الوحدات البنائية هي الرايبونيوكليوسيدات ثلاثي الفوسفات.

وفي المراحل المبكـرة لدراسـة الحامض DNA ظهرت حقيقة غريبة. فعلى الرغم من أن نسب النيوكليوتيدات في الحامض DNA كانت مختلفة من نوع إلى نوع إلا أنه مهما كانت كمية الأدنين (A) في عينة ما من الحامض DNA فإن كمية الثايمين (T) كانت مساوية لها تماما. وبالمثل فإن كمية السيتوزين (C) في الحامض DNA لنوع معين كانت دائما مساوية لكمية الجوانين (G). وسوف تتضح أهمية هذه النتائج في الباب رقـم ١٢ حينما ندرس تركيب الحامض DNA بتفصيل أكثر.

علينا كذلك أن نلاحظ أن كمية وتركيب القواعد في الحامض النووي DNA في أي خلية (دم - كبـد - كلية .... الخ) لكائن ما متشابه دائما (ماعدا في الأمشاج - الحيوانات المنوية والبويضات - التي يوجد فيها نصف ما للخلايا الأخرى من الحامض DNA) وهذا أيضا له أهمية قصوى سوف نلمسها في أبواب لاحقة.

تلعب النيوكليوتيدات أدوار هامة أخرى الى جانب كونها وحدات الحامض DNA والحامض RNA. فجميع الكائنات الحية تستعمـل ثلاثـى فوسفـات الأدنيوزيـن ATP كعملة لنقل الطاقة من التفاعلات المنتجة للطاقة إلى جميع التفاعلات المستهلكة للطاقة في الخلية. سيدرس هذا الـدور الذي يلعبة ATP في البابين رقم ٧ و ٨. في أبواب لاحقة سنجد كذلك أن النيوكليوتيدات تساهم في نشاط الكثير من الإنزيمات والهرمونات.

في هذا البـاب والباب السابق درسنا مجموعة من التركيبات إنتهت الى الجزيئات الكبيرة ذات الحيوية البالغة لتركيب و وظيفة الكائنات الحية وعلينا الآن أن نحاول سد واحد من أكبر الفراغات في معلوماتا عن تنظيم المادة الحية. وذلك يحدد كيف تتجمع وتنتظم هذه الجزيئات الكبيرة لتبنى التراكيب المختلفة للوحدة الأساسية للحياة نفسها ألا وهي الخلية.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تتكون الكائنات الحية من جزيئات عضوية أي جزيئات تحتوي على ذرات كربون. وترتبط ذرات الكربون مع بعضها في الجزيئات العضوية بروابط تساهمية في حلقات أو سلاسل يتراوح عدد ذرات الكربون فيها بين ذرتين وملايين الذرات. وهناك ٤ مراتب من الجزيئات العضوية في الكائنات الحية.

١ ــ جزيئات الليبيد التي تحتوي على نسبة كبيرة من ذرات الكربون والهيدروجين. الليبيدات مكونات أساسية في أغشية الخلية كما أنها مصدر غني بالطاقة. وأغلب الليبيدات غير قابل أو قليل الذوبان في الماء.

٢ ــ جزيئات الكربوهيدرات تحتوي على ذرات الكربون والهيدروجين والأكسجين حيث تكون نسبة ذرات الهيدروجين إلى ذرات الأكسجين هي ٢ : ١. السكرات هي من المواد الكربوهيدراتية وبعضها مصدر جيد للطاقة وهي أيضا الوحدات البنائية لبلمرات مثل النشا والسيليلوز.

٣ ــ البروتينات هي بلمرات غير متفرعة وخطية وذات جزيئات كبيرة، وحداتها هي الأحماض الأمينية. تستخدم الكائنات الحية ٢٠ حامض أميني في تخليق البروتينات.

٤ ــ الأحمـاض النـووية أيضاً بلمرات غير متفرعة خطية. ووحداتها التركيبية هي النيوكليوتيدات. الحـــامض DNA يتكـون من دي أكسي ريبـونيوكليوتيدات. ويشكل الحامض DNA المعلومات الوراثية التي تبنى عليها غالبية الكائنات الحية.

تمارين و مسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ أكتب الصيغة التركيبية للدهن المتعادل ثلاثى البالميتين (حامض البالميتيك = C_{15} H_{34} COOH)

٢ ــ أكتب معادلة لتحويل ثلاثي البالميتين إلى صابون.

٣ ــ ميز بين النظائر والنظائر الضوئية.

٤ ــ ميز بين التركيب الابتدائي والثانوي والثلاثي والرباعي للبروتين.

٥ ــ كيف يختـلف الحامـض RNA عن الحامض DNA.

٦ ــ ما هو نوع الغذاء الذي ينتج أكبر كمية من الماء الأيضى عندما يتأكسد.

٧ ــ أكتب الصيغة التركيبية لثلاثي الببتيد الذي يحتوي على جلايسين – الانين – فينايل ألانين.

٩ ــ أي من عديدي الببتيد التخليقيين الآتيين ينتــج محلول أكثــر قاعــدية: عديد الليســين أو عديد الفينايل الانين؟ أيهما أكثر قابلية للذوبان في الماء.؟

١٠ ــ أذكر إسم نظير ضوئي للجلوكوز وللسكروز.

Refrences المراجــع

1- PHELPS, C.F. Polysaccharides, Oxford Biology Readers, No. 27, Oxford University Press, Oxford, 1972.
2- PHILLIPS, D.C. and A.C.T. NORTH, Protein Structure, Oxford Biology Readers, No. 34, Oxford University Press, Oxford, 1973. Includes a viewer through which many of the illustrations can be seen in three dimensions.
3- DICKERSON, R.E., and I. GEIS, The Structure and Action of Proteins, Benjamin, Menlo Park, Calif., 1969. Includes several stereo pairs of models of proteins. A stereo supplement and stereo viewer are also available.
4. THOMPSON, E. O. P., "The Insulin Molecule, " Scientific American Offprint No. 42, May, 1955. Describes the techniques used to determine the primary structure of the insulin molecule.
5. KENDREW, J. C., "The Three - Dimensional Structure of a Protein Molecule," Scientific American, Offprint No. 121, December, 1961. How X-ray crystallography was used to determine the tertiary structure of the myoglobin molecule.
6. PERUTZ, M. F., "The Hemoglobin Molecule," Scientific American. Offprint No. 196, November, 1964. How the tertiary structure of hemoglobin was established.
7. KORNBERG, A., "The Synthesis of DNA ", Scientific American, Offprint No. 1124, October, 1968. In describing how biologically active DNA was first synthesized in the test tube, the author provides a clear exposition of the chemistry and structure of DNA.

CHAPTER 5 الباب الخامس

THE CELLULAR BASIS OF LIFE الأساس الخلوي للحياة

THE CELL AS THE UNIT OF STRUCTURE OF LIVING THINGS	٥-١ . الخلية كوحدة التركيب في الكائنات الحية
THE CELL MEMBRANE	٥-٢ . غشاء الخلية
THE NUCLEUS	٥-٣ . النواة
THE CYTOPLASM	٥-٤ . السيتوبلازم
MITOCHONDRIA	٥-٥ . الميتوكوندريا
CHLOROPLAST	٥-٦ . البلاستيدات الخضر
RIBOSOMES	٥-٧ . الريبوسومات
THE ENDOPLASMIC RETECULUM	٥-٨ . الشبكة الإندوبلازمية
THE GOLGI APPARATUS	٥-٩ . جهاز جولجي
LYSOSOMES	٥-١٠ . الليسوزومات
PEROXISOMES	٥-١١ . البيروكسيزومات
VACUOLES	٥-١٢ . الفجوات
THE FUNCTIONS OF INTRACELLULAR MEMBRANES	٥-١٣ . وظائف الأغشية داخل الخلية
MICROFILAMENTS	٥-١٤ . الخيوط الدقيقة
INTERMEDIATE FILAMENTS	٥-١٥ . الخيوط البينية

الباب الخامس

الأساس الخلوي للحياة

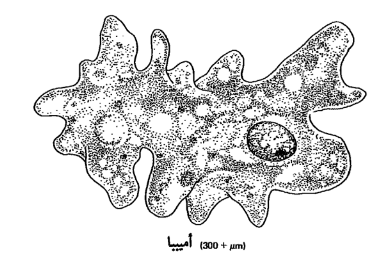
في الباب السابق درسنا تركيب بعض الجزيئات الكبيرة المميزة للمادة الحية ولكن السيليلوز والنشا والبروتين وحتى الأحماض النووية ليست حية. فقط عندما تنتظم هذه (وغيرها) في الأنظمة المعقدة الفعالة التي تتكون منها خلية فإنها تعبر الحد الفاصل بين غير الأحياء والأحياء. الخلية هي أصغر وحدة للحياة. ونهدف في هذا الباب إلى دراسة بعض السمات التركيبية للخلايا. وفي سبيل ذلك سوف نحاول أن نضيِّق واحدة من أوسع الفجوات في علوم الأحياء: كيف تبنى التركيبات المرئية في الخلية من الجزيئات الكبيرة التي درسنا تركيبها آنفا.

٥-١ . الخلية كوحدة التركيب في الكائنات الحية.

THE CELL AS THE UNIT OF STRUCTURE OF LIVING THINGS

في حالات كثيرة تكون الخلية المفردة هي الكائن الحي. الأميبا amoeba (الشكل ٥-١) التي تقطن المياه العذبة واحدة من هذه الحالات. وهي خلية يبلغ عرضها ٣٠٠ ميكرومتر أي حوالي نقطة في هذه الصفحة. وفي داخل هذه العبوة توجد الآليات التي تؤدي بها جميع وظائف الحياة. فهي تغذي نفسها وبطرق أخرى تتبادل المادة والطاقة مع بيئتها، وهي تستجيب للمؤثرات وتنمو وتتكاثر.

البكتريا الكروية العنقودية staphylococcus هي خلية كروية يبلغ قطرها ١ ميكرومتر (الشكل ٥-١) وهي أصغر بكثير من أن ترى بدون التكبير العالي للمجهر. ومع ذلك فهي أيضا تحتوي في خلاياها المفردة على آليات الحياة. وأصغر من ذلك هي



خلية من خد إنسان (60 µm)

خلية دم حمراء (7.5 µm)

بكتيريا كروية عنقودية (1 µm)

ميكوبلازما (0.15 µm)

الشكل ٥-١. مقارنة أحجام خلايا مختلفة. تكاد الأميبا أن ترى بالعين المجردة والميكوبلازما لاترى بوضوح الا تحت المجهر الاليكتروني.

الميكوبلازما mycoplasma هذه المخلوقات وحيدة الخلية تبلغ من الصغر حداً بحيث لايمكن رؤيتها إلا بواسطة مجهر إليكتروني. ولكنها ما زالت كائنات حية بكل معنى الكلمة وتتضح فيها كل مظاهر الحياة وهي في الواقع أصغر خلايا وأصغر الكائنات الحية المعروفة. بل أنه يبدو مستحيلا تجميع وتنظيم أليات جزيئية تكفي للحياة في حيز أصغر من حجم الميكوبلازما.

معظم المخلوقات على هذا الكوكب تتكون من عديد من الخلايا والانسان البالغ يحتوي على ٦ × ١٠^١٣ من الخلايا المختلفة. هناك مثالان تسهل دراستهما وهما الخلايا الطلائية التي تبطن السطح الداخلي للخد وكرات الدم الحمراء (الشكل ٥-١). وسوف نذكر أمثلة أخرى في نهاية هذا الباب. تختلف هذه الخلايا عن خلايا الكائنات

وحيدة الخلية مثل الأميبا في ناحية هامة: فهي لاتستطيع أن تعيش حياة مستقلة أي أنها لاتستطيع القيام بكل وظائف الكائن الحي. فكل خلية منها حية بدون شك ولكن كل خلية تكون متخصصة في أداء وظيفة واحدة أو وظائف قليلة للكائن التي هي جزء منـه وعـلى ذلك تكون كل خلية معتمدة على الخلايا الأخرى في أداء الوظائف التي لاتستطيع هي القيام بها. فالخلية العصبية مثلا تنقل بسرعة الأشارات الكهربية في الجسم ولكنها تعتمد بالكامل على خلايا الدم الحمراء التي تجلب لها الأكسجين الذي تموت بدونه.

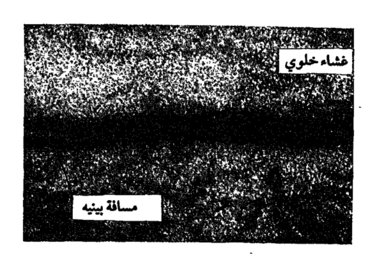
وعـلى الرغم من تباين أنواع الخلايا فأننا نجد بعض الصفات التركيبية والوظيفية المشتركة بين معظم (وليس بالضرورة كل) الخلايا. وهدفنا الأساسي في هذا الباب هو دراسة أهم هذه الصفات.

٥-٢ . غشاء الخلية THE CELL MEMBRANE

واحدة من الميزات العامة للخلايا هي وجود غشاء خارجى محدد لها. غشاء الخلية هذا يعمل كخط مواجهة بين الاليات الموجودة في داخل الخلية والسائل المائي الموجود خارجها. وغشاء الخلية رقيق لدرجة أنه لايرى إلا بالمجهر الاليكتروني. في الشكل (٥-٢) توجد صورة مجهر إليكتروني توضح قطاع في أغشية خليتين متجاورتين وكل غشاء سمكة حوالي ١٠ نانومتر. والفحص الدقيق يبين أن الغشاء يتكون من ٣ طبقات تبدو كخطين قاتمين يفصلهما فراغ.

طريقة أخرى لدراسة غشاء الخلية هي عزلة عن بقية الخلية ومعرفة الجزيئات التي يتكون منها. وكرات الدم الحمراء هي مصدر سهل للحصول على تحضيرات نقية من الغشاء. ويبين التحليل الكيميائي أن الغشاء يحتوي على حوالي ٥٠٪ ليبيد و ٥٠٪ بروتين.

أما الليبيد فإنه يتكون أساساً من فوسفوليبيدات (مثل فوسفاتيديل إيثانول - أمين - راجع الشكل ٤-٧) والكولستيرول. والفوسفوليبيدات كما تذكر جزيئات مزدوجة المحبة للماء أي أن كل جزىء يحتوي على رأس محب للماء وذيل كاره للماء وقد رأينا بالفعل طريقتين يمكن لهذه الجزيئات بها توجيه أنفسهم عند تعرضهم للماء من أحد

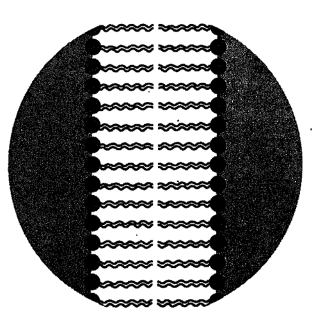


الشكل ٥-٢. غشاء الخلية (١٧٠٠٠٠ مرة) ويشاهد هنا غشائي خليتين متجاورتين (عن فاوست : الخلية. محتوياتها وعضياتها. و. ب. سوندرز ١٩٦٦).

الاتجاهات (الشكل ٤-٦). ولكن غشاء الخلية يلامس الماء على جانبية فداخل الخلية مائي وخارجها السائل المحيط بها ولذلك فأن غشاء الخلية يكون بمثابة حاجز بين وسطين مائيين فكيف يمكن للفوسفوليبيدات مزدوجة المحبة للماء أن تتكيف مع هذه المتطلبات؟ عندوضع نقطة من الفوسفوليبيد في الماء فأن الجزيئات تترتب في أزواج بطريقة ذيل لذيل وبذلك تكون رؤوسهم المحبة للماء متجهة نحو الخارج أي إلى الوسط المائي على كل جانب بينما تكون الذيول الكارهة للماء محمية من ملامسة الماء (الشكل ٥-٣).

هكذا تتكون طبقة مزدوجة من الفوسفوليبيد phospholipid bilayer لها معظم خصائص الأغشية الخلوية، فهي تسمح مثلا بمرور الجزيئات الكارهة للماء من جانب إلى آخر بسهولة ولكنها تشكل حاجزا يمنع مرور الأيونات Na^+, K^+, Cl^-. مثل هذا الغشاء الذي يسمح بمرور بعض الجزيئات والأيونات وليس البعض الآخر يوصف بأنه إنتخابي النفاذية. الأغشية الخلوية وهذه الأغشية الأصطناعية إنتخابية النفاذية ويبلغ سمك هذه الأغشية الاصطناعية ذات الطبقة المزدوجة من الفوسفوليبيد حوالي ٤,٥ نانومتر.

ماذا عن البروتينات التي توجد مصاحبة للأغشية؟ هناك عدة نقاط استقر الرأي عليها. الأولى هي أن بعض البروتينات يسهل فصلها عن الليبيد في الغشاء عن بروتينات أخرى. والبروتينات التي يسهل فصلها عن الليبيد تميل إلى أن تكون محبة للماء بسبب محتواها الكبير من رواسب الأحماض الأمينية المحبة للماء وفضلا عن ذلك فأن

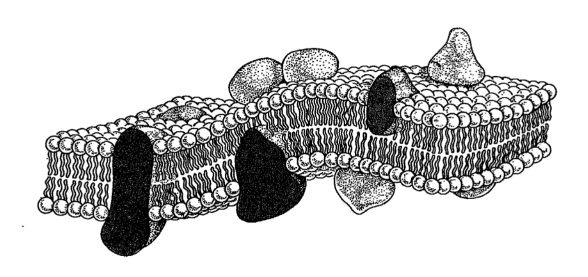


الشكـل ٥-٣. طبقة مزدوجة من الفوسفوليبيد. هذا التركيب ينشيء حاجزا مستقرا بين محلولين مائيين.

بعض هذه الـبروتينـات تحتـوي على سكـرات وعـديدات تسكـر مترابطة تساهميا. والسكرات بما لها من محتوي كبير من مجموعات الهيدروكسيل تساهم أيضا في الطبيعة المحبة للماء لهـذه الجلايكوبروتينات glycoproteins وهـذه البروتينـات التـي يسهـل فصلـها والمحبـة للماء تسمـى بروتينات خارجية extrinsic proteins وهي توجد على السطحين الخارجي والداخلي لغشاء الخلية (الشكل ٥-٤) (الجلايكو بروتينات توجد بصفـة خاصـة على السطح الخارجي). هذه البروتينات الخارجية ربما لاتنفذ خلال الطبقة المزدوجة من الفوسفوليبيد للغشاء.

بروتينات أخرى تنفذ إلى الطبقة المزدوجة من الليبيد وأحيانا تنفذ خلالها بالكامل. هـذه هـي البروتينـات الداخلية intrinsic proteins (الشكل ٥-٤). الجزء من جزيء البروتين الذي يستقر في الطبقة المزدوجة من الليبيد يكون كاره جداً للماء بفضل ما له من محتوي كبير من الأحماض الأمينية الكارهة للماء. وعلى الرغم من ذلك فأن أجزاء السلسلة عديدة الببتيد التي تبرز من الطبقة المزدوجة لليبيد يكون بها نسبة عالية من الأحماض الأمينية المحبة للماء.

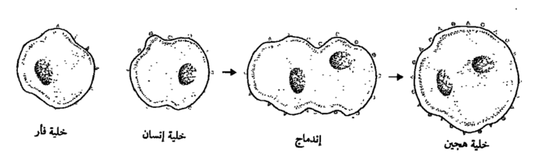
الغشـاء الخلوي غير متـماثـل حيث تكون البروتينات الخارجية المصاحبة للسطح الخـارجي من الغشاء مختلفة تماما عن البروتينات المصاحبة للسطح الداخلي. وطبقة الليبيد المزدوجة هي أساسا شريط من الزيت ولذلك نتوقع أن تكون المواد المنغمسة فيها



الشكل ٥-٤. تركيب أغشية الخلية. الأشياء الكروية تمثل بروتينات ملتصقة أو مخترقة لطبقة الفوسفوليبيد المزدوجة. الأجزاء المعرضة من البروتينات تميل الى أن تكون محبة للماء بينما تميل الأجزاء المغمورة في طبقة الفوسفوليبيد المزدوجة الى أن تكون كارهة للماء.

حرة نسبيا لتسبح فيها ويبدو أن الحالة كذلك فعلا. فهناك الآن وسائل معملية تجعل من الممكن دمج أغشية من نوعين مختلفين تماما من الخلايا. وعندما يحدث ذلك فإن البروتينات المميزة لكل خلية سرعان ماتختلط مع بعضها (الشكل ٥-٥). ملاحظة أخرى تؤيد فكرة أن بروتينات الغشاء حرة نسبيا لتتحرك جانبيا في الطبقة المزدوجة من الليبيد هي ظاهرة التغطية capping. من الممكن إتصال علامات markers ـ جزيئات يمكن بسهولة جعلها مرئية - الى بروتينات الغشاء في أنواع معينة من الخلايا. هذه العلامات يمكن أن تكون جزيئات متألقة أو مشعة. وفي البداية تتوزع هذه الجزيئات بالتساوي على سطح الخلية ولكنها تهاجر بسرعة إلى أحد أجزاء الخلية. ونفترض أنها قد نقلت الى هناك بواسطة حركة بروتينات الغشاء التي إتصلت بها.

توجد الأغشية كذلك داخل جميع أنواع الخلايا تقريبا. وتحت المجهر الاليكتروني يكون لهذه الاغشية الداخلية نفس مظهر غشاء الخلية أو على الأقل مظهر مشابه له. وهي أيضا تحتوي على الليبيد والبروتين ولكن بعض الليبيدات قد تكون مختلفة عن تلك الموجودة في غشاء الخلية. والبروتينات في الأغشية الداخلية بالتأكيد مختلفة عن بروتينات غشاء الخلية وهذه الاختلافات في التركيب تعكس الوظائف الخاصة التي تقوم



الشكل ٥-٥ . إندماج الخلايا. السرعة التي يتم بها الخلط التام بين بروتينات أسطح الخلايا دليل حي على سلاسة الغشاء الخلوي.

بها هذه الأغشية الداخلية. واحدة من هذه الوظائف هي تكوين أنواع من الحجرات التي تغلفها هذه الأغشية داخل الخلية. وأوضح هذه الحجرات هي التي نسميها النواة. وفي الواقع فإن النواة تجذب الانتباه في معظم الخلايا لدرجة أن كل ما عداها في الخلية ينضم تحت كلمة سيتوبلازم.

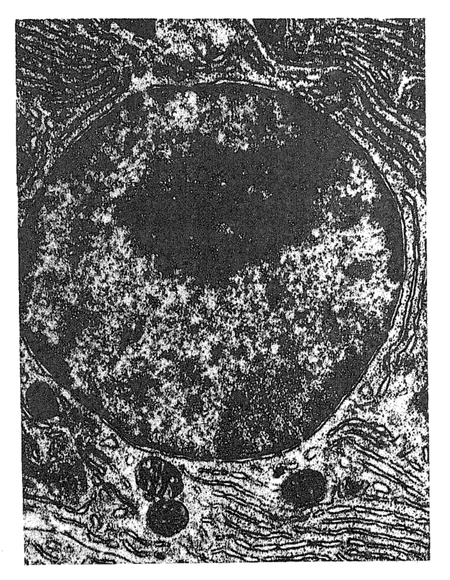
٥-٣. النواة THE NUCLEUS

النواة يحدها من الخارج زوج من الأغشية ولذلك يكون الغلاف المحيط بها مستمراً ولكن توجد به ثقوب كما يتضح من الشكل ٥-٦ . وهذه الثقوب قد تسمح بمرور المواد من وإلي داخل النواة.

يوجـد داخـل غشـاء النـواة وسط نصف سائـل معلقـة فيه الكـرومـوسومات أو الصبغيات. وهذه توجد عادة على هيئة خيوط طويلة تصعب رؤيتها بالمجهر الضوئي. وتسمى كروماتين عندما تكون في هذه الحالة.

عندما تستعد الخلية للإنقسام إلى خليتين يتغير مظهر الكروموسومات فتلتف الخيوط الـطويلة الرفيعة على نفسها وتتحول إلى أجسام غليظة كثيفة حيث يمكن بمساعدة أصباغ مناسبـة رؤيتـها بسهولـة بواسطـة المجهـر الضـوئي (الشـكل ٥-٧). وأثنـاء عمليـة إنقسـام الخليـة تتـوزع الكـــرومـوســومـــات بأعـداد متســاويـة تماماً بيـن الخليتيـن البنويتيـن daughter cells.

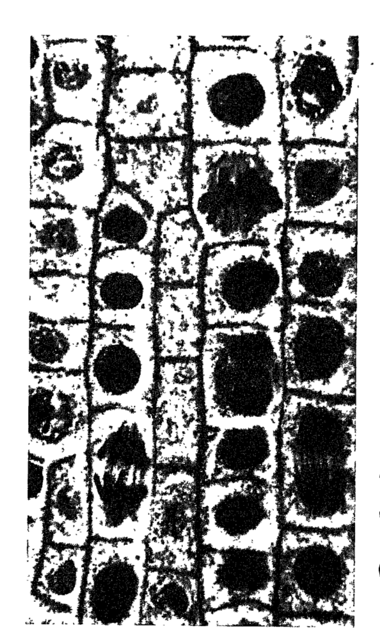
من الناحية الكيميائية تتركب الكروموسومات من الحامض DNA وبروتينات. وغير



الشكـل ٥-٦. النـواة والسيتوبلازم المحيط بها في خلية من بنكرياس الخفـاش (١٨٠٠٠ مرة). لاحظ البنـاء مزدوج الـطبقة للغشاء النووي والثقوب الموجودة به. هل يمكنك التعرف على تراكيب خلوية أخرى؟ (صورة بالمجهر الأليكتروني بتصريح من د. دون و. فاوست).

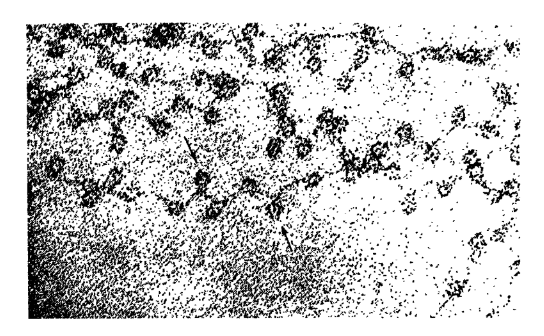
معروف على وجه اليقين ما إذا كان الكروموسوم الواحد يحتوي على جزيء واحد فقط من حامض DNA أو عدة جزيئات منه ولكن الأدلة ترجح الحالة الأولى.

والـبروتينـات الـرئيسيـة المصـاحبـة للكـرومـوسومات هي الهستونات histones. والهستونات بروتينات قاعدية وذلك لأنها غنية بالأحماض الأمينية مثل لايسين وأرجنين.



الشكل ٥-٧. خلايا منقسمة من جذور البصل. التراكيب الداكنة التي تشبة حدوة الحصان هي الكروموسومات. في معظم الخلايا لا يمكن مشاهدتها الا في وقت انقسام الخلية. وهي الفترة المسماه بالانقسام غير المباشر.
(بتصريح من تيرتوكس).

وكل من هذه الأحماض به مجموعة أمينو حرة يمكنها إكتساب بروتون على زوج الاليكترونات غير المقتسم بها. على ذلك تكون الهستونات موجبة الشحنة. أما الحامض DNA فهو سالب الشحنة لكثرة مجموعات الفوسفات به، فلا عجب إذن إذا كانت الهستونات قوية الارتباط بالحامض DNA. وهناك خمسة أنواع من الهستونات في الكروموسومات.



الشكل ٥-٨. تركيب الكروماتين من خلية دم حمراء في الصوص. الأجسام الكروية (مميزة بأسهم) هي النيوكليوسومات وكل منها يتكون من حشوة من جزيئات الهستون مغلفة بالحامض DNA . النيوكليوسومات تتصل بخيط من الحامض DNA طولة حوالي ١٤٠ انجستروم (بتصريح من دونالد إي. أولينز وأدا ل. أولينز - جامعة تينيسي).

عندما يحضر الكروماتين بطريقة خاصة فإن المجهر الاليكتروني يبين خيوط طويلة تحمل إنتفاخات موزعة على مسافات متساوية. هذه الإنتفاخات تسمى نيوكليوسومات nucleosomes (الشكل ٥-٨) أي الأجسام النووية أما الخيط الموصل بينها فهو الحامض DNA. كل جسم نووي يحتوي على الحامض DNA وأربعة من أنواع الهستونات الخمسة.

توجد بروتينات أخرى مع الحامض DNA في الكروماتين ولكن بكميات أقل من الهستونات وهذه البروتينات الأخرى توصف أحيانا بالبروتينات الحامضية ولكن اللاهستونية قد يكون وصفا أدق. العلاقات الوظيفية بين الحامض DNA والهستونات واللاهستونات سوف نتعمق فيها في باب لاحق.

أثناء الفترة بين إنقسامات الخلية حينما تكون الكروموسومات في حالتها المتمددة فأن واحدا أو أكثر منها قد يحمل كتلة كبيرة كروية. هذا الجسم (النوَّية nucleolus) يمكن

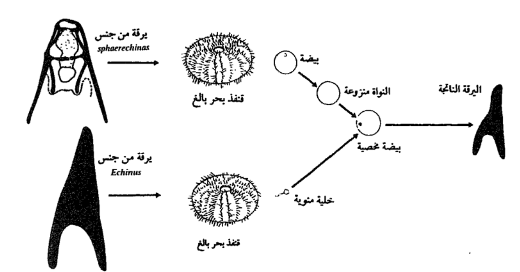
مشاهدتة بسهولة من خلال المجهر الضوئي . هنا يتم تخليق عدة أنواع من الحامض RNA التي تستعمل في تجميع الريبوسومات ribosomes. الريبوسومات لاغنى عنها لتخليق البروتينات في الخلية ولا عجب إذن أن الخلايا النشيطة جداً في تخليق البروتين تحتوي عادة على نويات كبيرة .

النواة هي مركز التحكم في الخلية ، فإذا تحطمت النواة في خلية بيضة فلن تتمكن البيضة من التحول إلى فرد جديد وإذا ماإنتزعت النواة من الأميبا فإن الكائن يستمر حياً لأيام قليلة . ومع ذلك فلن يستطيع التغذية أو التكاثر وفي النهاية يموت . أما إذا أمكن حقن نواة في الأميبا في خلال يوم أو يومين من عملية إنتزاع النواة فإنها تستعيد نشاطها العادي وقدرتها على التكاثر.

وحتى قبل إختراع المجهر التناولي الدقيق micromanipulator فإن أهمية النواة في تحديد مايحدث في السيتوبلازم قد تحققت للعالم الألماني تيودور بوفري . فقد إستطاع بوفري إنتزاع الأنوية من بيضات أحد أنواع قنفذ البحر من جنس *Sphaerechinus* بواسطة الرج الشديد . ثم سمح لهذه البيضات المنزوعة الأنوية أن تخصب بحيوانات منوية من قنفذ البحر من جنس *Echinus*. الحيوانات المنوية أصغر بكثير من خلايا البيضات حيث تتكون من نواة وذيل يدفعها . في عملية الاخصاب تخترق النواة خلية البيضة وبالتالى فإن إخصاب البيضات منزوعة الأنوية لجنس *Sphaerechinus* بحيوانات منوية من جنس *Echinus* يؤدي إلى إستبدال نوع من الأنوية بنوع آخر . وقد حفز الاخصاب خلايا البيضات الى الانقسام والتحول إلى يرقات قنفذ البحر. نظرة إلى الشكل (٥-٩) توضح أن هذه اليرقات تحمل كل صفات النوع من جنس *Echinus* وليس *Sphaerechinus* وعلى الرغم من أن إسهام *Echinus* إلى الجهاز ككل يزيد قليلا عن نواة مفردة ضئيلة فإن هذه النواة دفعت الكتلة الهائلة من سيتوبلازم *Sphaerechinus* إلى النمو طبقاً لخطة *Echinus*.

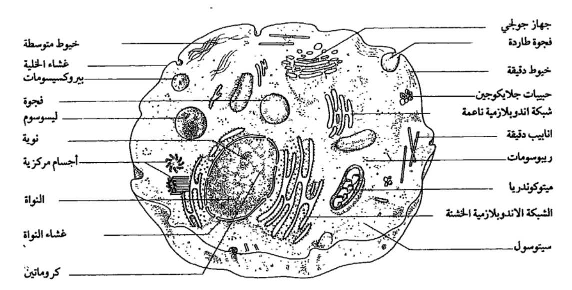
٥-٤ . السيتوبلازم THE CYTOPLASM

إستعملت كلمة سيتوبلازم تقليديا لوصف كل شيء داخل الخلية ماعدا النواة . وفي الايام الاولى لعلم الخلية عندما كان النذر اليسير معروفا عن تنظيم المواد خارج النواة كانت هذه الكلمة مفيدة . ولكن مع ظهور الطرق المحسنة لدراسة الخلية فقد عرفنا



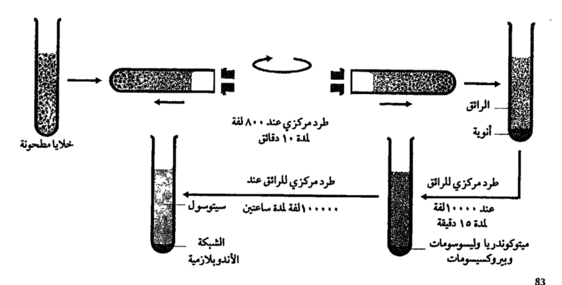
الشكل ٥-٩. تجربة بوفري التي أوضحت أهمية النواة في السيطرة على الخلية. نواة من جنس *Echinus* في سيتوبلازم من جنس *Sphaerechinus* أنتجت يرقة لها خصائص جنس *Echinus* .

الكثير عن التعقيدات غير العادية للتراكيب الموجودة في منطقة السيتوبلازم. وقد بين المجهر الاليكتروني الأنماط المعقدة للأغشية والغرف التي تحدها الأغشية الموجودة في السيتوبلازم (الشكل ٥ - ١٠). هذه التراكيب واضحة المعالم تسمى العضيات organelles.



الشكل ٥-١٠. منظر لخلية حيوانية نموذجية كما قد تشاهد تحت المجهر الاليكتروني. على الرغم من عدم وجود صورة واحدة بالمجهر الاليكتروني تبدو فيها كل التراكيب المبينة فان الرسم يمثل منظرا مركبا لما قد يبدو في عدة صور بالمجهر الاليكتروني كتنظيم لأجزاء الخلية.

طريقة مفيدة أخرى لدراسة أجزاء الخلية هي تهشيم عدد كبير من الخلايا ثم وضعهم في أنبوبة ولف الأنبوبة في جهاز للطرد المركزي. سوف يوقع ذلك قوة طرد مركزية على العضيات في خليط الخلايا حيث تقذف الأشياء الكبيرة أو الثقيلة إلى قاع الأنبوبة أسرع من الأشياء الصغيرة الخفيفة. وتعريض مخلوط الخلايا للطرد المركزى لمدة ١٠ دقائق وبقوة تعادل حوالى ٨٠٠ مرة قوة الجاذبية الأرضية سيجعل الأنوية تترسب في قاع الأنبوبة لتكون راسب (الشكل ٥-١١). وعند إستعمال قوة أكبر لمدة أطول تترسب العضيات الأصغر والأخف. ويمكن فصل هذه العضيات ودراستها كيميائيا ومجهريا. وبعد التعرض للطرد المركزي لمدة ساعتين وبقوة ١٠٠٠٠٠ مرة قدر قوة الجاذبية تكون كل عضيات الخلية تقريبا قد ترسبت. أما السائل المتبقي فوق الراسب فهو يمثل ما تبقى من السيتوبلازم بعد فصل كل العضيات. هذه إذن هي المادة التي كانت عضيات السيتوبلازم معلقة بها. وقد أعطيت عدة أسماء مثل المادة الأساسية ground substance و الهيالوبلازم hyaloplasm و السيتوسول cytosol وغيرها. وهي تتكون أساساً من الماء مذابا فيه عديد من الجزيئات الصغيرة والأيونات وكميات كبيرة من البروتين وفي الواقع فإن عدداً من الانزيمات الضرورية لأيض الخلية



الشكل ٥-١١. تجزئة الخلية بواسطة الطرد المركزي. يتم أولا تهتك الخلايا لخروج محتوياتها ثم يعمل الطرد المركزي البطيء على ترسيب التراكيب الثقيلة وهي الأنوية في قاع الأنبوبة أما السائل المتبقي فيتعرض لطرد مركزي أقوى فتترسب العضيات الأصغر مثل الميتوكوندريا. وبعد طرد مركزي أخير فان السائل يحتوي على ريبوسومات حرة وبعض الجزيئات الذائبة في السيتوسول.

توجد هنا. ولكن أغلب وظائف السيتوبلازم هي وظائف العضّيات الموجودة فيه. دعنا الآن ندرس هذه الوظائف.

٥-٥. الميتوكوندريا MITOCHONDRIA

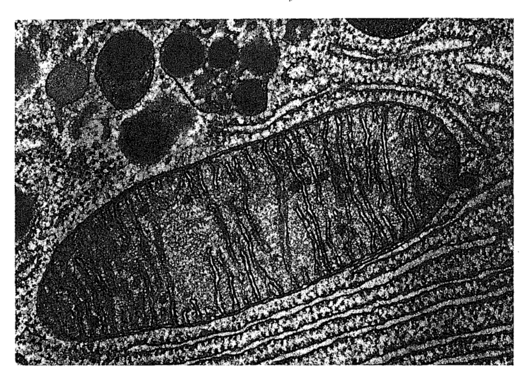
الميتوكوندريا هي أجسام كروية أو عصوية تتراوح في الحجم بين ٠,٢ ميكرون الى ٥ ميكرون ويختلف عددها في الخلية ولكن الخلايا النشيطة (خلايا الكبد مثلا) قد تحتوي على أكثر من ألف منها. وعلى الرغم من أن الميتوكوندريا الكبيرة يمكن مشاهدتها بالمجهر الضوئي إلا أن المجهر الاليكتروني فقط هو الذي يستطيع توضيح تركيبها. تبين صور المجهـر الاليكتروني أن كل ميتوكوندريون يكون محدداً بغشاء مزدوج. الغشاء الخارجي يكون أملس غير متقطع أما الغشاء الداخلي فتوجد به إنحناءات متكررة تبرز إلى داخـل تجويف الميتـوكـونـدريون (الشكل ٥-١٢). هذه الانحناءات التي تشبه الرفوف تسمى زوائد cristae.

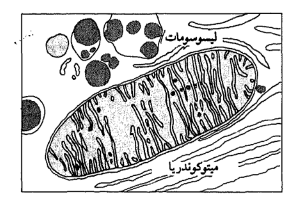
ويبدو أن أغشية الميتوكوندريا تشبه غشاء الخلية فهي تحتوي مثلها على الفوسفوليبيد والبروتين وبعض البروتين خارجي بينما الكثير منه داخلي أي منغمس في الطبقة المزدوجة من الليبيد.

وظيفة الميتوكوندريا واضحة تماما. فهي تحتوي على الانزيمات التي تقوم بأكسدة المواد الغـذائية وهي تقـوم بتخليق ATP وهـو عملة الـطاقـة في الخلية. وعـلى ذلـك فإن الميتوكوندريا تقوم بتحويل الطاقة الموجودة في مختلف المواد الغذائية الى طاقة مختزنة في ATP. وتستغل الخلية الطاقة الموجودة في ATP للقيام بنشاطاتها المختلفة. وعلى ضوء ذلك فلا عجب أن تتجمـع الميتـوكوندريا في أكثر أجزاء الخلية نشاطا. والخلايا العصبية والخلايا العضلية والخلايا الافرازية تحتوي على العديد من الميتوكوندريا التي تقبع في أكثر أجزاء الخلية نشاطا في نقل النبضات الكهربية والانقباض والافراز على الترتيب. وقـد أطلق على الميتوكوندريا لقب بيت الطاقة في الخلية عن جدارة. وسوف ندرس تركيبها ووظيفتها بتفصيل أكبر في الباب السابع.

٥-٦. البلاستيدات الخضر CHLOROPLASTS

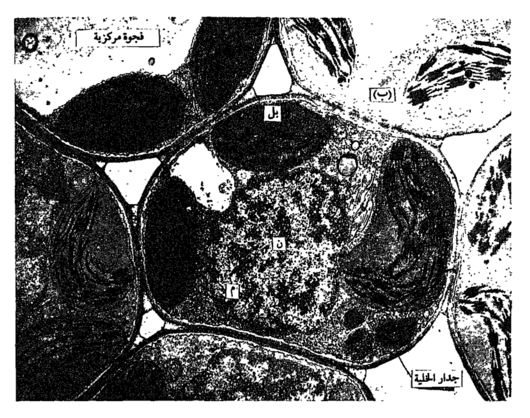
توجد البلاستيدات الخضر في خلايا النباتات وبعض الطحالب فقط. وهي توجد





الشكل ٥-١٢. ميتوكوندريون من خلية بنكرياس الخفاش. لاحظ الغشاء المزدوج والطريقة التي ينثني بها الغشاء الداخلي لتكوين زوائد. الأجسام الداكنة والمحاطة بغشاء أعلى الميتوكوندريون هي الليسوسومات. (بتصريح من كيث ر. بورتر).

عادة في شكل قرصي يبلغ قطرة ٥ إلى ٨ ميكرون ويبلغ سمكة ٢ إلى ٤ ميكرون (الشكل ٥-١٣). وقد تحتوي خلية نباتية واحدة على ٥٠ بلاستيدة. يحد البلاستيدة غشاء مزدوج يوجد بداخلة نظام معقد من الأغشية الداخلية منغمسة في وسط سائل يسمى الحشوة stroma. والأغشية الداخلية غنية بالفوسفوليبيدات والبروتينات كما تحتوي كذلك على أصباغ أهمها الكلوروفيل chlorophyll (أو اليخضور). واللون الأخضر للكلوروفيل المختلط مع أغشيتها هو الذي يسبغ اللون الأخضر على البلاستيدات الخضر وبالتالي على الخلايا والأنسجة النباتية المعرضة للضوء.



الشكل ٥-١٣. خلايا من ورقة عباد الشمس. لاحظ النواة (ن) والبلاستيدات الخضر (بل) والميتوكوندريا (م) والبللورات (ب) والفجوة المركزية والجدار الابتدائي للخلية في هذه الخلايا النموذجية.
(صورة بالمجهر الاليكتروني بتصريح من هـ. ج. أرنوت وكينيث م. سميث).

يعمل الكلوروفيل على إصطياد الطاقة من ضوء الشمس ثم استخدامها في تخليق الغذاء. ولذلك فإن البلاستيدة الخضراء هي مكان حدوث عملية البناء الضوئي photosynthesis. بدون العضيات لايمكن أن توجد الحياة على الارض. في الباب ٨ سوف ندرس عملية البناء الضوئي وفي أثناء ذلك سوف ندرس ببعض التفصيل تركيب ووظيفة البلاتيدات الخضر.

٥-٧. الريبوسومات RIBOSMOMES

الريبوسومات هي من أصغر التراكيب المعلقة في السيتوبلازم (الشكل ٥-١٠). هذه الاجسام الكروية تقريبا من الضآلة (٢٠ نانومتر) حتى أنها لاترى الا بواسطة

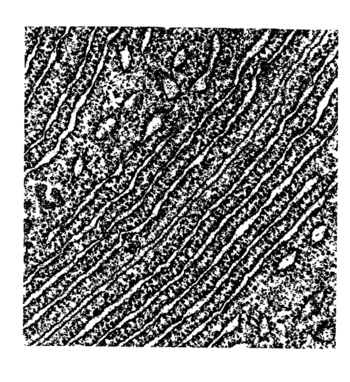
المجهر الاليكتروني. والريبوسومات هي المواقع التي يتم فيها تخليق البروتينات وقد تشكل الريبوسومات حوالى ٢٥٪ من الوزن الجاف للخلايا التي تكون نشيطة بصفة خاصة في تخليق البروتين (مثل خلايا الكبد).

وقد درست الريبوسومات في بعض البكتريا بتعمق لأنها أصغر و أقل تعقيداً من ريبوسومات الكائنات الأرقى. وفي بكتريا الأمعاء *E. coli* يحتوي كل ريبوسوم على نسخة واحدة من كل من الأنواع الثلاثة من الحامض RNA . وبالاضافة إلى ذلك يوجد **٥٤** جزىء بروتين مختلفة جميعهم ماعدا واحد أو اثنين في نسخ مفردة. ولذلك يمكن اعتبار الريبوسوم كتجمع منظم دقيق لجزيئات كبيرة. وهنا يمكن الربط بين التركيب المعروف للجزئيات الكبيرة (البروتين والحامض RNA) وتركيب إحدى العضيات بدقة أكبر من أي مكان آخر في الخلية. وسوف نقدم تفاصيل أكثر عن وظيفة الريبوسومات في تخليق البروتين في الباب ١٣.

بعض البروتينات المختلفة في الخلية تضاف ببساطة الى سائل السيتوبلازم حيث تؤدي عملها فيه. وتخليق مثل هذه البروتينات (مثل الهيموجلوبين في كرات الدم الحمراء) يتم في الريبوسومات الموزعة عشوائيا في السيتوبلازم . في حالات أخرى يتم تغليف البروتينات المخلقة حديثاً فيها يشبه عضية يحدها غشاء. خلايا الكبد والبنكرياس على سبيل المثال تخلق كميات كبيرة من البروتينات يتم تغليفها بغشاء ثم في النهاية تفرزها الخلية. الريبوسومات التي يتم فيها تخليق هذه البروتينات تكون متصلة بأغشية الشبكة الاندوبلازمية.

٥-٨. الشبكة الاندوبلازمية THE ENDOPLASMIC RETICULUM

الشبكة الأندوبلازمية هي نظام معقد من الأغشية داخل الخلية. وتبدو الأغشية في أزواج عندما ترى في قطاعات الخلية المجهزة للفحص بالمجهر الأليكتروني وتضم في ثناياها فجوات مفلطحة وأنابيب (الشكل ٥-١٤). ومن المحتمل أن تكون هذه الفراغات على إتصال ببعضها البعض. وللأغشية تركيب من الليبيد والبروتين يشبه الأغشية الأخرى في الخلية. وكل غشاء في الشبكة الأندوبلازمية له سطح مواجه للسيتوسول وآخر مواجه لداخل التجويف.



الشكل ٥-١٤. الشبكة الإندوبلازمية الخشنة. صفوف الريبوسومات الموزعة بالتساوي تتصل بسطح الأغشية المواجه للسيتوسول ويتم افراز البروتينات التي تقوم بتخليقها الى داخل القنوات التي تكونها أزواج الأغشية. (٨٥٠٠٠ مرة - بتصريح من كيث ر. بورتر).

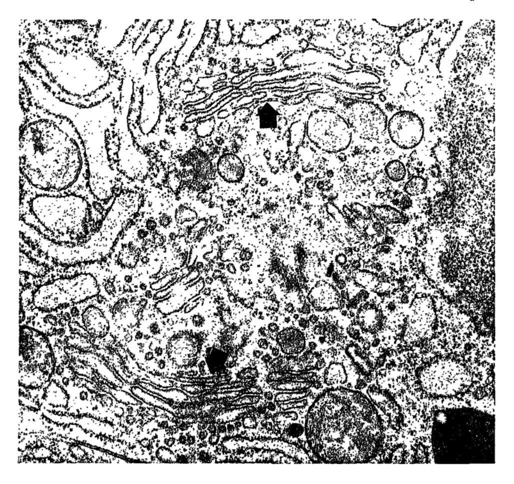
إذا نظرت إلى صورة المجهر الأليكتروني في الشكل (٥-١٤) فإنك سوف ترى صفوفاً موزعة بإنتظام من الريبوسومات الملتصقة بسطح أغشية الشبكة المواجهة للسيتوسول. هذه الشبكة الأندوبلازمية المرصعة بالريبوسومات تسمى الشبكة الأندوبلازمية الخشنة rough endoplasmic reticulum أو RER . الريبوسومات هي مواقع تخليق البروتين وهذه الملتصقة ب RER تصب سلاسل عديد الببتيد المخلقة حديثاً في داخل تجاويف الشبكة. تحتوي النهاية الأمينية لعديدات الببتيد على تتابع إشارة خاص يتكون من ١٢ إلى ٢٤ من الأحماض الأمينية معظمها كارهة للماء ويعتقد أن هذا هو الذي يمكنها من أختراق الأغشية الكارهة للماء في RER . وبمجرد أن توجد على الجانب الآخر فإن تتابع الإشارة يستبعد منها. وبعد ذلك يحدث تعديل اضافي في عديد الببتيد مثل تكوين روابط ثنائي الكبريتيد بين وحدات السيستايين والتصاق السكرات بها. وبذلك تكون البروتينات المخلقة بواسطة RER معبأدة داخل أغشية. وقد تبقى لكي تستعمل داخل الخلية أو قد يتم إفرازها من الخلية.

توجد الشبكة الأندوبلازمية أيضا بدون ريبوسومات ملتصقة بها. تسمى شبكة اندوبلازمية ملساء smooth endoplasmic reticulum أو SER . ومن المحتمل أن

تكون SER مرتبطة بتخليق أنواع أخرى من الجزيئات مثل الدهون والفوسفوليبيدات والستيرويدات. وقد تكون أيضا مصدر الأغشية التي يتكون منها جهاز جولجي.

٥-٩. جهاز جولجي THE GOLGI APPARATUS

يوجد جهاز جولجي في كل الخلايا الحيوانية والنباتية تقريباً وهو يتكون من مجموعة من الأكياس المفلطحة المحددة بأغشية (الشكل ٥-١٥). وهو أوضح مايكون في الخلايا النشيطة في الأفراز. تنتقل البروتينات المخلقة في RER إلى جهاز جولجي حيث يضاف إليها مواد كربوهيدراتية وعلى أي حال فإن البروتينات تتراكم في أكياس جهاز جولجي حتى تمتلىء هذه الأكياس تماما بالبروتين وقد تهاجر هذه الأكياس المحشوة



الشكل ٥-١٥. جهاز جولجي (الأسهم). في هذه الخلية (من خفاش) يستعمل جهاز جولجي في المراحل الختامية لتخليق البروتينات التي تفرزها الخلية. (بتصريح من كيث ر. بورتر).

بالبروتين إلى سطح الخلية لتفرغ محتوياتها إلى الخارج. وقد تبقى أكياس أخرى مملؤة بالبروتين كونها جهاز جولجي داخل الخلية على هيئة ليسوسومات.

جهاز جولجي هو أيضا الموقع الذي يتم فيه تخليق عديدات التسكر مثل المخاط. والسيليلوز الذي تفرزه الخلايا النباتية لتكوين جدار الخلية يتم تخليقه داخل جهاز جولجي.

٥-١٠. الليسوسومات LYSOSOMES

الليسوسومات هى تراكيب كروية تقريبا يحدها غشاء مفرد ويبلغ قطرها عادة ١,٥ ميكرون إلا أنه شوهدت ليسوسومات يبلغ قطرها ٠٥. ٠ ميكرون فقط. الليسوسومات ينتجها جهاز جولجي وهي ممتلئة بالبروتينات وهذه تتكون من حوالي ٣٦ نوع من انزيمات التميؤ، من بينها الأنزيات التي تهضم عديدات التسكر والليبيدات والفوسفوليبيدات والاحماض النووية والبروتينات. ويعتقد أن وجود هذه الانزيمات داخل الليسوسومات يمنعها من هضم بقية أجزاء الخلية.

عندما توجد في الخلية مواد مطلوب هضمها فإنها تدخل أولا في الليسوسومات. هذه المواد قد تكون بعض تراكيب الخلية نفسها مثل الميتوكوندريا التي توقفت عن العمل بكفاءة أو دقائق الغذاء التي قد تدخل إلى الخلية. في حالة خلية الدم البيضاء المبينة في الشكل (٥-١٦) فان هذه المواد كانت بكتريا ودقائق أخرى ضارة إلتهمتها الخلية.

تلعب الليسوسومات دورا هاما أيضا في موت الخلايا، فعندما تموت الخلية أو يحدث بها جرح تساعد الليسوسومات في تحللها وفي ذلك إفساح للمجال أمام خلية لتحل محلها. وموت الخلايا يمثل مرحلة ضرورية في دورة حياة بعض الكائنات. فمثلا عندما يتحول أبو ذنيمة إلى ضفدعة فإن ذيله يمتص تدريجيا. خلايا الذيل - وهي غنية بالليسوسومات - تموت وتستغل نواتج تحللها في نمو خلايا جديدة في جسم الضفدعة النامية.

توجد الليسوسومات في جميع أنواع الخلايا الحيوانية تقريبا ولكن لايوجد حتى الان دليل قاطع على وجودها في خلايا النباتات.



الشكل ٥-١٦. إحدي خلايا الدم البيضاء. الأجسام الصغيرة الداكنة في السيتوبلازم هي الليسوسومات (٧٥٠٠ مرة - من فاوست: الخلية: عضياتها ومحتوياتها - و. ب. سوندرز وشركاه - ١٩٦٦).

٥-١١. البيروكسيسومات PEROXISOMES

للبيروكسيسومات نفس حجم الليسوسومات تقريبا (٠,٣-١٥ ميكرون) ومثلها تكون محددة بغشاء مفرد. كذلك تشبه الليسوسومات في إحتوائها على إنزيمات يكون الكاتاليز catalase من أبرزها. يحفز الكاتاليز تكسير فوق أكسيد الهيدروجين - hydrogen peroxide (H_2O_2) وهو ناتج خطر من نواتج الأيض في الخلية. قد تلعب البيروكسيسومات دورا أيضا في تحويل الدهون إلى كربوهيدرات وفي تكسير البيورينات داخل الخلية. وقد الحقت وظائف أيضية أخرى بالبيروكسيسومات في أنسجة أو كائنات معينة ولكن بإستثناء نشاطات الكاتاليز ليس من بينها وظيفة واحدة مشتركة في جميع البيروكسيسومات.

في الحيوانات يكون وجود البيروكسيسومات مقصورا على خلايا الكبد والكلية. أما في النباتات فإنها قد توجد في عدة أنواع من الخلايا. وغالبا ماتحوي البيروكسيسومات في الخلايا النباتية مادة متبلورة. ومن المحتمل أن تكون البيروكسيسومات في الخلايا النباتية والحيوانية ناتجة من الشبكة الاندوبلازمية.

٥-١٢. الفجوات VACUOLES

الفجوات هي عضيات سيتوبلازمية ممتلئة بسائل ويحدها غشاء مماثل لغشاء الخلية. وفي الواقع فإن الفجوات غالبا ماتنشأ عن طريق ثنيات للداخل ثم فصم جزء من غشاء الخلية وقد توجد مواد غذائية أو مخلفات داخل الفجوات.

تحتوي الخلية النباتية الحديثة على العديد من الفجوات الصغيرة ولكن كلما نضجت الخلية فإن هذه الفجوات تتحد مع بعضها لتكوين فجوة مركزية central vac-uole كبيرة (الشكل ٥-١٣) قد توجد بها مواد غذائية ذائبة أو مخلفات أو أصباغ.

٥-١٣. وظائف الأغشية داخل الخلية
THE FUNCTIONS OF INTRACELLULAR MEMBRANES

معظم تراكيب الخلية التي نوقشت حتى الآن لها أغشية كجزء من تركيبها. وعموما يبدو أن لهذه الأغشية وظيفتان أساسيتان إحداهما هي ببساطة تكوين غرف داخل الخلية. فالكروموسومات التي تحمل الشفرة الوراثية تكون معزولة عن بقية الخلية بواسطة الغشاء النووي. والانزيمات الهاضمة الموجودة في الليسوسومات تُمنع من الاتصال بالسيتوسول بواسطة الأغشية التي تحدها والنواتج الافرازية للخلايا تظل معزولة في قنوات الشبكة الاندوبلازمية وجهاز جولجي.

الدور الهام الثاني الذي تلعبة الأغشية في الخلية هو نقل المواد في إتجاه واحد. فأغشية RER تنقل جزيئات البروتين من سطح الغشاء المواجه للسيتوسول إلى داخل الـ SER (الفراغ). تنقل الأغشية الداخلية للميتوكوندريا والبلاستيدات الخضر أيونات الهيدروجين (H^+) في إتجاه واحد : إلى داخل الميتوكوندريا وإلى داخل البلاستيدات الخضر. كذلك ينتقل عدد من الأيونات والجزيئات الأخرى في إتجاه واحد

عبر الأغشية المختلفة للخلية. وكل ذلك يدلنا على أن أغشية الخلية ليست متماثلة فالجزيئات المعرضة على أحد سطحى الغشاء تختلف عن تلك المعرضة على سطحه الآخر.

٥-١٤. الخيوط الدقيقة MICROFILAMENTS

الخيوط الدقيقة هي ألياف رفيعة طويلة يبلغ قطرها ٥-٦ نانومتر. تتكون هذه الألياف من بروتين يسمى أكتين actin. أعداد كبيرة من هذه الخيوط الدقيقة تكون مجموعات أو شبكات في أماكن مختلفة من الخلية (الشكل ٥-١٠) ويرتبط وجودها بحركة الخلية. فمثلا عندما تنقسم خلية حيوانية إلى إثنتين تتكون حزمة من الألياف الدقيقة تشق الخليتين البنويتين بعيدا عن بعضهما.

في كثير من الخلايا يتحرك السيتوبلازم وهذه ظاهرة تسمى سريان السيتوبلازم cytoplasmic streaming وهذه الحركة تعتمد على وجود الخيوط الدقيقة. والخيوط الدقيقة هي سمة أساسية من سمات الخلايا التي تهاجر من مكان إلى آخر والتي تغير شكلها. لاينطبق ذلك فقط على الخلايا المستقلة حرة الحركة مثل الأميبا ولكن أيضا على معظم الخلايا الحيوانية خلال مراحل تكوين الجنين. وإنفصام الأجزاء المنثنية للداخل من غشاء الخلية (راجع القسم ٥-١٢) يعتمد كذلك على قدرة الخيوط الدقيقة على الانقباض.

٥-١٥. الخيوط المتوسطة INTERMEDIATE FILAMENTS

الخيوط المتوسطة هي ألياف سيتوبلازمية طويلة يبلغ متوسط قطرها ١٠ نانومتر وهي تسمى متوسطة لأن قطرها أكبر من قطر الخيوط الدقيقة (٦ نانومتر) وأصغر من قطر الأنابيب الدقيقة (٢٥ نانومتر) والخيوط الغليظة (١٥ نانومتر) في ألياف العضلات الهيكلية. (خصائص الخيوط الغليظة سوف ندرسها في الباب ٣٠). أمكن التعرف على خمسة أنواع من الخيوط المتوسطة وكل منها يتكون من واحد أو أكثر من البروتينات التي ينفرد بها كل نوع. وعلى الرغم من التباين الكيميائي فإنه يبدو أن كل الخيوط المتوسطة تلعب دورا هاما متشابها في الخلية وهو تكوين هيكل دعامي داخل الخلية. فعلى سبيل المثال فأن النواة في الخلايا الطلائية (و كذلك خلايا الجلد) تكون مثبتة في موضعها



الشكل ٥-١٧ . الخيوط المتوسطة في خليتين طلائيتين كما تكشفها أصباغ متألقة. على الرغم من عدم صبغ أي تراكيب خلوية أخرى مباشرة. لاحظ الترتيب الذي يشبه السلة حول كل نواة. (بتصريح من ماري أوزبورن و. فرانك وك. ويبر. البحوث التجريبية للخلية العدد ١٢٥ ص ٣٧ - ١٩٨٠).

بواسطة شبكة تشبه السلة من الخيوط المتوسطة (الشكل ٥-١٧) وهي تتكون من الكيراتين (راجع القسم ٤-٤).

توجد الخيوط المتوسطة في جميع أنواع الخلايا العضلية حيث تعمل على تثبيت الأجزاء المنقبضة في الخلية في مواضع محددة. للخلايا العصبية إمتدادات طويلة تسمى

المحاور أو الأعصاب axons تسافر خلالها النبضات العصبية. يبلغ طول المحاور في بعض الخلايا العصبية أكثر من مليون ضعف سمكها وعلى الرغم من هذا الشكل الضعيف إلا أن هذه المحاور لا تنقطع بسهولة بفضل القوة التي تكتسبها من الخيوط المتوسطة التي يمتلىء بها السيتوبلازم فيها.

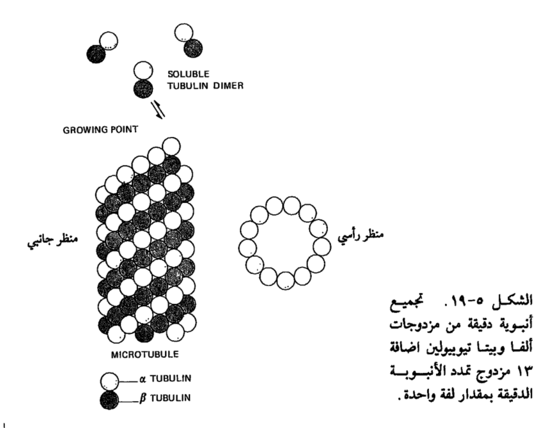
٥-١٦. الأنابيب الدقيقة MICROTUBULES

الأنابيب الدقيقة هي أسطوانات مجوفة مستقيمة من البروتين توجد في أغلب الخلايا الحيوانية والنباتية (الشكل ٥-١٨). قطرها الخارجي يبلغ ٢٥ نانومتر وقطر التجويف حوالي ١٥ نانومتر. أما طولها فمتغير ولكن هناك أنابيب دقيقة يبلغ طولها حوالي ألف ضعف سمكها (أي حوالي ٢٥ ميكرون).

البروتين الذي تتركب منه الأنابيب الدقيقة يسمى تيوبيولين tubulin ويوجد منه نوعان (الفا تيوبيولين tubulin- α وبيتا تيوبيولين tubulin- β) وكلاهما له نفس الحجم تقريبا حيث يبلغ الوزن الجزيئي لكل منهما ٥٥٠٠٠ دالتون تقريبا. يتصل جزيئان واحد من كل نوع مع بعضهما (لاتساهميا) لتكوين مزدوج dimer. هذا المزدوج (وهو مثال للتركيب الرباعي للبروتين - راجع القسم ٤-٤) هو حجر البناء الذي تتكون منه الأنابيب الدقيقة. ويبدو أن بناء جدار الأسطوانة يتم بأضافة المزدوجات واحداً بعد



الشكل ٥-١٨. تجمع متوازي من الأنابيب الدقيقة في القدم المحورية لأحد الحيوانات الأولية التي تعيش في المياة العذبة. الأقدام المحورية هي إمتدادات دقيقة للسيتوبلازم والأنابيب الدقيقة ضرورية للمحافظة على شكلها. يمكن مشاهدة مناظر أخرى للأقدام المحورية في الأشكال ٣٧-٤ و ٣٧-٥. (بتصريح من لويس جـ. تيلني بجامعة بنسلفانيا).

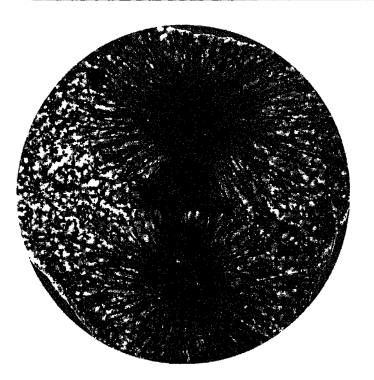


الشكل ٥-١٩. تجميع أنبوبة دقيقة من مزدوجات ألفا وبيتا تيوبيولين اضافة ١٣ مزدوج تمدد الأنبوبة الدقيقة بمقدار لفة واحدة.

الآخر في ترتيب حلزوني رقيق (الشكل ٥-١٩). إضافة ١٣ مزدوج تتمم لفة كاملة. وعند مشاهدة الجدار في قطاع عرضي فإنه يبدو مكون من ١٣ خيط أولي protofilament

ويبدو أن الأنابيب الدقيقة تكون صلبة ويعتقد أنها تكسب أجزاء الخلية التي توجد بها بعض الصلابة وبذلك تسهم الأنابيب الدقيقة مع الخيوط الدقيقة والخيوط المتوسطة في بناء تركيب السيتوبلازم. وعند إزالة جميع محتويات الخلية ماعدا هذه العناصر الليفية الثلاث فإن الشكل الأساسي للخلية يبقي كما هو. ومن الواضح أن سيتوبلازم الخلية ليس قطرة بسيطة من سائل وانما هو نظام محكم التنسيق من الخيوط الدقيقة والخيوط المتوسطة والأنابيب الدقيقة المترابطة.

تلعب الأنابيب الدقيقة أيضا دورا هاما في إنقسام الخلية. فالانقسام الناجح يتطلب التوزيع الدقيق للكروموسومات على الخلايا البنوية حيث يتحرك كل كروموسوم نحو مقره النهائي نتيجة إتصاله بحزمة من الأنابيب الدقيقة. وتعرف المجموعة الكاملة من الأنابيب الدقيقة المشاركة في هذه العملية باسم المغزل spindle (الشكل ٥ ـ ٢٠).



الشكل ٥-٢٠ . الانقسام غير المباشر في خلية من جنين السمــك الأبيض. تحركت الكـرومـوسـومات الى مركز الخـليــة حيـث كونت كتلة داكنــة ثم اتصلت بالمغـزل وهو تجمع من الألياف يمتد بين قطبي الخلية. حول كل قطب يوجــد جهــاز من الأليــاف في نظام شعــاعي يعـرف بالنجم aster وكـلا من المغزل والنجم يتركب من أنابيب دقيقة .
(بتصريح من تيرتوكس).

كذلك تستعمل الأنابيب الدقيقة في بناء السنتريولات (أو الأجسام المركزية) والأجسام القاعدية والأهداب والأسواط .

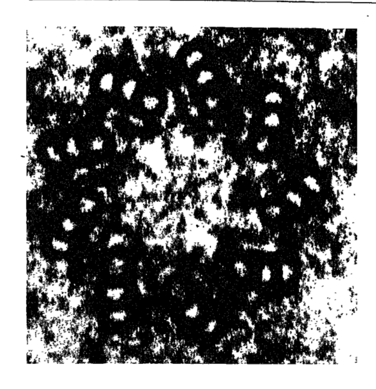
٥ـ١٧ . السنتــريــولات CENTRIOLES

تحتـوي الخـلايا الحيوانية وخـلايا بعض الكـائنات الدقيقة والنباتات الدنيئة على جسمين مركزيين في السيتوبلازم بالقرب من السطح الخارجي للنواة. يتكون كل جسم مركزي من تجمع أسطواني لتسع أنابيب دقيقة ويتصل بكل واحدة من الأنابيب الدقيقة التسع أنبوبتان جزئيتان (كما ترى في المقطع العرضي) (الشكل ٥-٢١). وعادة ما يشكل الجسمان المركزيان زاوية قائمة.

وقبل بدء إنقسام الخلية مباشرة يتضاعف السنتريولان ويهاجر كل زوج نحو جانب مقـابل من جانبي النواة ثم ينشأ المغزل بينهما. في بعض الخلايا تتضاعف الأجسام المركزية لتنتج الأجسام القاعدية للأهداب والأسواط.

٥-١٨ . الأهداب والأسواط CILIA AND FLAGELLA

لـمعــظـم الخـلايـا إمتـدادات قـد تكـون قصيـرة (أهــداب cilia) أو طويلـة

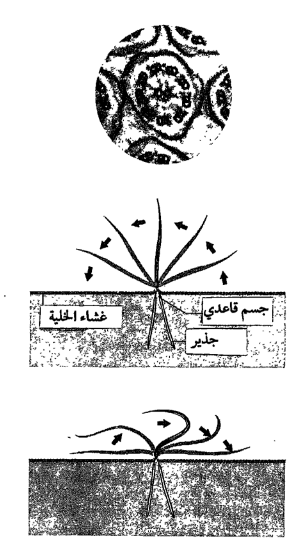


الشكل ٥-٢١. الجسم المركزي في خلية من جنين الفأر كما يرى في مقطع عرضي عند تكبير ٣٠٥٠٠٠ مرة (بتصريح من أي. ديهارفن - معهد سلون كترنج لأبحاث السرطان. مأخوذة عن : النواة - أكاديميك برس - نيويورك - لندن - ١٩٨٦).

(أسواط flagella) في الكائنات الدقيقة تستعمل الأهداب والأسواط للحركة. و مع ذلك فالكثير من الحيوانات بها خلايا ذات أهداب تكون وظيفتها ببساطة إبعاد المواد عن الخلايا. الخلايا المبطنة للقصبة الهوائية ذات أهداب.

ويبدو أن منشأ وتركيب الأهداب والأسواط واحد. ففي كلتا الحالتين تنمو من أجسام قاعدية basal bodies. وهذه لها نفس تركيب الأجسام المركزية وتنشأ منها. والهدب cilium أو السوط flagellum نفسه ليس له حلقة خارجية من تسع أنابيب دقيقة فقط (كل منها له الأن أنبوبة مساعدة واحدة متصلة بها) ولكن له أيضا ليفتان مركزيتان تشبهان الأنابيب الدقيقة في التركيب تماما (الشكل ٥-٢٢). وفي حالة الأهداب والاسواط يكون النظام كلة مغلفا بغشاء هو ببساطة إمتداد لغشاء الخلية.

ترجع أوجه الشبه بين تركيب الأهداب والأسواط والأجسام القاعدية والسنتريولات وتركيب الأنابيب الدقيقة أننا بصدد أحد المكونات البنائية الأساسية للخلية. فتجمع مزدوجات التيوبيولين في صورة أنابيب دقيقة يتطلب شكلا من أشكال المواقع البادءة أو القالب template. والمرشح المنطقي لهذه الوظيفة هو السنتريولات - أو الأجسام القاعدية المشتقة من السنتريولات. وبينما يظل العديد من الأسئلة حول وظيفة

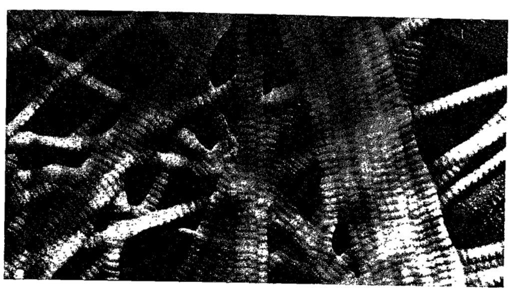


الشكل ٥-٢٢. الى أعلى : صورة بالمجهر الاليكتروني لهدب مفرد في مقطع عرضي. لاحظ النمط المميز للأنابيب الدقيقة (بصريح من بيتر ساتير). الى أسفل: رسوم لهدب مفرد. الرسم العلوي يوضح ضربة القوة والرسم السفلي يوضح ضربة الارتداد.

الانابيب الدقيقة بدون إجابة فان فهم الطريقة التي يقود بها تركيب جزيئات كبيرة بعينها (الفا وبيتا تيوبيولين) نحو تركيب العضيات المختلفة المكونة من أنابيب دقيقة قريب المنال.

٥-١٩. طلاءات الخلية CELL COATINGS

نادرا مايكون غشاء الخلية هو السطح الخارجي للخلية وعادة يكون هناك نوع من الطلاء الخارجي. في الخلايا الحيوانية يبدو أن هذا الطلاء مكون من مركب معقد من البروتين وعديد التسكر. وهو ليس بصلب ولكنه يعمل على لصق الخلايا ببعضها



الشكـل ٥-٢٣. خيوط من الكولاجين وهو بروتين (تكبير ٢٢٠٠٠ مرة). (بتصريح من د. جيروم جروس).

البعض. في الشكـل (٥-٢) يكون ذلك ممثلا بخط رفيع بين غشائي الخليتين. وفي حالات عديدة يكون أكثر سمكا عما هو واضح في هذا الشكل وغالبا ما تكون خيوط البروتين كولاجين collagen (الشكل ٥-٢٣) منغمسة في الطلاء السميك.

في كثير من الطحالب وكل النباتات يتكون الطلاء الخارجي من عديد التسكر السيليلوز وهو يكون جدار الخلية cell wall الذي يكون صلبا وعلى هيئة صندوق وهو من أهم مميزات هذه الخلايا. في الشكل (٥-١٣) يشاهد بوضوح جدار الخلية الذي يحيط بكل واحدة من خلايا دوّار الشمس.

إذا نظرت إلى الشكل (٤-١٥) فسوف ترى النسق المنظم الذي تترسب به ليفات السيليلوز لتكوين جدار الخلية. وعلى حين يبقي النسق الدقيق الذي تنتظم به جزيئات السيليلوز لتكوين ليفات محل شك فإن الطبيعة الخطية للجزيئات والفرص العديدة لتكوين روابط هيدروجينية جانبية هي بالضبط ما يبتغية المرء لتكوين ليفات طويلة صلبة.

توجد الجدر الصلبة أيضا حول خلايا البكتريا والفطريات ولكن تستعمل في بنائها عديدات تسكر أخرى غير السيليلوز.

٥-٢٠ . بدائيات النواة وحقيقات النواة
PROKARYOTES VERSUS EUKARYTOES

بينما لاتحتوي جميع الخلايا على جميع التراكيب التي وصفت في هذا الباب فان معظم هذه التراكيب تكون شائعة الوجود في خلايا الحيوانات والنباتات وحتى في أغلب الأحياء الدقيقة . ومع ذلك فهناك مجموعتان من الأحياء الدقيقة ـ البكتريا والطحالب الخضراء المزرقة ـ تكون الخلايا فيهما مختلفة عن خلايا بقية الكائنات من عدة نواحي هامة. فخلاياها لاتحتوي على أنوية يحدها غشاء وليس فيها ميتوكوندريا ولا بلاستيدات خضر ولاشبكة إندوبلازمية ولا أجهزة جولجي ولا ليسوسومات ولا بيروكسيسومات ولا فجوات وبأختصار لاتوجد فيها عضيات تحدها أغشية ولو أنه قد توجد بها طبقات من أغشية داخلية (الشكل ٥-٢٤). وعلى الرغم من أن بعض البكتريا يكون لها أسواط إلا أن هذه تتكون ببساطة من خيوط مفردة ولا يتمثل بها الترتيب متعدد الخيوط من ٩ + ٢ الذي نجده في أسواط وأهداب الكائنات الأخرى. ويستعمل اللفظ بدائية النواة prokaryotic لتمييز خلايا البكتريا والطحالب الخضراء المزرقة عن الخلايا حقيقية النواة eukaryotic لجميع الكائنات الأخرى.



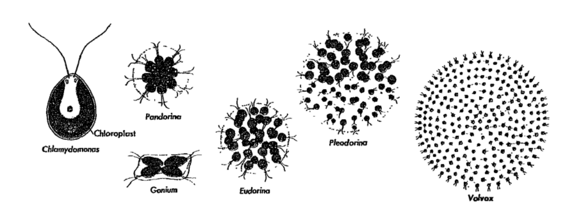
الشكل ٥-٢٤.
صورة بالمجهر الاليكتروني (٢٧٠٠٠ مرة) لطحلب أخضر مزرق. على الرغم من وجود أغشية داخلية في هذا الكائن بدائي النواة إلا أنها ليست منتظمة في عضيات محاطة بأغشية كما هو الحال في الكائنات حقيقية النواة.
(بتصريح من د. ج. كوهين بازير).

٥-٢١ . التشكل (أو التكشف) DIFFERENTIATION

رأينا أن الكائنات الحية تتكون من خلية واحدة أو أكثر. الطحلب الأخضر المجهري كلاميدوموناس *Chlamydomonas* كائن وحيد الخلية وفي داخل هذه الخلية توجد كل المعدات اللازمة لممارسة الوظائف الحيوية المختلفة. ومن حين إلى آخر ينقسم الكلاميدوموناس لتكوين فردين بعد أن كان فردا واحدا. وتتلقى كل خلية بنوية مجموعة كاملة من الضوابط النووية الموجودة في الخلية الأم. وقبل البدء الفعلي لانقسام الخلية يتضاعف كل كروموسوم في النواة وأثناء عملية إنقسام الخلية تنفصل الكروموسومات المتضاعفة وتهاجر مجموعة كاملة الى كل من الخليتين البنويتين بدقة بالغة. الأنقسام غير المباشر mitosis هو اللفظ الذي يستعمل لوصف هذه العملية الهامة وهي الألية التي تتكاثر بها الكائنات وحيدة الخلية كما أنها تمثل أليه للنمو في الكائنات عديدة الخلايا. وفي كلتا الحالتين فهي تمثل مهربا من النمو الزائد أو التضخم في الخلايا المفردة. فعادة ما تؤدي الخلايا الصغيرة عملها بكفاءة أكبر من الخلايا الكبيرة وأحد أسباب ذلك أن نسبة مساحة السطح الى الحجم في الخلايا الصغيرة تكون أعلى منها في الخلايا الكبيرة (الشكل ٥-٢٥) وبذلك يكون تبادل المواد بين السيتوبلازم والوسط الخارجي المحيط بالخلية أسرع.

من بين الطحالب الخضر ذوى الاسواط توجد عدة أشكال من المستعمرات (الشكل ٥-٢٦). هذه الأنواع تسمى مستعمرات لأنها تتكون من تجمعات من خلايا مستقلة

الشكل ٥-٢٥. نسبة مساحة السطح الى الحجم في المكعب تتناقص بزيادة الحجم. نفس العلاقة تنطبق على الخلايا والكائنات.



الشكل ٥-٢٦. مجموعة من الطحالب الخضر ذوات الأسواط التي تتشابه خلاياها والتي تتمثل فيها الأنماط وحيدة الخلية والمستعمرات وعديدة الخلايا. الخلايا الصغيرة في البليودورواينا ومعظم الخلايا في الفولفوكس غير قادرة على التكاثر. مقياس الرسم يتناقص من اليسار الى اليمين.

فأذا عزلت خلية مفردة من جونيام *Gonium* أو باندورواينا *Pandorina* أو يودورواينا *Eudorina* فأنها سوف تسبح بعيدا وتشبه خلية الكلاميدوموناس. وحينها يحدث بها الانقسام غير المباشر فأنها سوف تكون مستعمرة بها نفس العدد المميز من الخلايا. أما في البليودورواينا *Pleodorina* والفولفوكس *Volvox* فأن الموقف يختلف بعض الشيء. في هاتين الحالتين فأن بعض خلايا المستعمرة (معظم الخلايا في الفولفوكس) لاتستطيع أن تعيش مستقلة. فأذا عزلت خلية لاتكاثرية من مستعمرة فولفوكس فانها لاتتكاثر بالإنقسام غير المباشر وفي النهاية تموت. ماذا حدث؟ بطريقة غير واضحة حتى الان عبر الفولفوكس الخط الفاصل بين الكائنات ذات المستعمرات والكائنات عديدة الخلايا الحقيقة. فعلى خلاف الجونيام لايمكن إعتبار الفولفوكس مستعمرة أو تجمع لعدد من الخلايا الفردية. فهو كائن واحد فقدت خلاياه القدرة على أن تعيش كل منهامستقلة. فاذا تحطم عدد كاف منها لسبب من الأسباب فان بقية كرة الخلايا سوف تموت. ماذا إستفاد الفولفوكس من هذا الترتيب؟ بفقدها القدرة على الاستقلال فإن خلايا الفولفوكس أصبحت متخصصة ولم تعد كل خلية تقوم بجميع وظائف الحياة (كما في المستعمرات) وبدلا من ذلك فقد تخصصت خلايا معينة في أداء وظائف معينة تاركة الوظائف الأخرى لخلايا أخرى متخصصة في أدائها. وفي الفولفوكس لاتعدو هذه العملية أبعد من تخصص بعض الخلايا في التكاثر بينما البقية (التي لا تستطيع التكاثر بنفسها) تسد إحتياجات البناء الضوئي والحركة. في الكائنات عديدة الخلايا الأكثر

تعقيدا (مثلنا) فأن درجة التخصص تزيد عن ذلك بكثير حيث يكون لكل خلية وظيفة أو إثنتان وتعتمد على بقية الخلايا لأداء كل الوظائف الأخرى اللازمة للابقاء على حياة الكـائن وبـالتالي حياتها. هذه العملية من تخصيص وتوزيع للعمل بين الخلايا تسمى التشكل (أو التكشف) differentiation. واحدة من أعظم مشاكل علم الأحياء هي كيف ينشأ التشكل بين الخلايا مع أنها جميعا نشأت عن طريق الأنقسام غير المباشر ولها نفس الضوابط النووية. سوف نناقش بعض الاجابات المبدئية لهذا التساؤل في الباب ١٨ .

لايمكن أن نتأكد أن الجونيام والباندوراينا واليودوراينا والبليودوراينا تمثل مراحل في تطور الفولفوكس عديد الخلايا من الكلاميدوموناس وحيد الخلية . وسواء كانت كذلك أم لا فأن هذه الكائنات تبين أحد الطرق التي تكون المستعمرات قد نشأت بها من كائنات وحيدة الخلية وكذلك التي قد تكون الكائنات عديدة الخلايا قد نشأت بها من مستعمرات . وهي تبين أيضا التغير الطفيف في علاقات الخلايا حينما تعبر الخط الوهمي الذي يفصل بين مستعمرات من خلايا مستقلة إلى كائنات تتركب من عديد من الخلايا المتشكلة والمعتمدة على بعضها البعض.

تتشكل الخلايا في الكائنات عديدة الخلايا بعدد كبير ولكنه محدود من الطرق. في الحيوان البشرى مثلا قد يوجد حوالي ١٠٠ نوع من الخلايا المتشكلة وكل نوع متميز تركيبيا عن بقية الأنواع . خلايا الدم الحمراء تكون على هيئة أقراص ضيئلة بدون نواة وخلايا العضلة الملساء تكون مغزلية الشكل وهكذا. وكل نوع من الخلايا له وظيفته الخاصة فخلايا الدم الحمراء تنقل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون وخلايا العضلة الملساء تنقبض فتعمل على إنقاص قطر الأعضاء الجوفاء مثل المثانة والأوعية الدموية وفي النهاية فإن العديد من أنواع الخلايا يتميز بوجود بروتين أو بروتينات معينة، فخلايا الـدم الحمـراء محشـوة بالهيمـوجلوبين وخلايا العضلة الملساء تحتوي على البروتينات المنقبضة أكتين وميوسين.

من أين أتت كل هذه الخلايا ؟ الأجابة واحدة بالنسبة لهم جميعا فهم سلالة البيضة المخصبة التي بدأنا جميعا منها. فنمو بيضة مخصبة إلى طفل يتطلب متوسطا قدرة ٤١ دورة إنقسام غيـر مباشـر ($٢^{٤١}$ = ٢و٢ × $١٠^{١٢}$) ولكنها تتطلب ماهو أكثر من ذلك . فالخلايا البنوية الناتجة من هذه الانقسامات لابد لها من الدخول في سبل متباينة للنمو

بحيث يصبح بعضها خلايا دم حمراء وبعضها بيضات والبعض الأخر خلايا عضلة ملساء وهكذا. هذه هي عملية التشكل أو التكشف.

في حالات عديدة يحدث التشكل مرة واحدة وفي المراحل المبكرة للنمو. فمثلا قد لايحدث المزيد من التشكل في الخلايا العصبية بعد مرحلة الطفولة. وفي حالات أخرى يستمر التشكل طول الحياة. فالأنواع المختلفة من خلايا الدم تستبدل دائما طول العمر وهناك دليل قوي أنهم جميعا (خلايا حمراء وكرات الدم البيضاء و . . . . . الخ) ينشأون من خلية أصلية واحدة تسمى خلية الأصل stem cell. الأنقسام غير المباشرة لهذه الخلايا (التي توجد في نخاع العظم) ينتج خلايا بنوية عليها أن تواجه أحد خيارين فبعضها يظل خلايا وبذلك تضمن أن بحيرة الخلايا لن تنضب والبعض الآخر عليه أن يسلك واحدا أو أخر من سبل التشكل. وكلما توغلوا في هذه السبل فإنهم يكتسبون تدريجيا التركيب والوظيفة والبروتينات المميزة لنوع الخلايا الذي يصيرون إليه في النهاية.

٥-٢٢. الأنسجة الحيوانية ANIMAL TISSUES

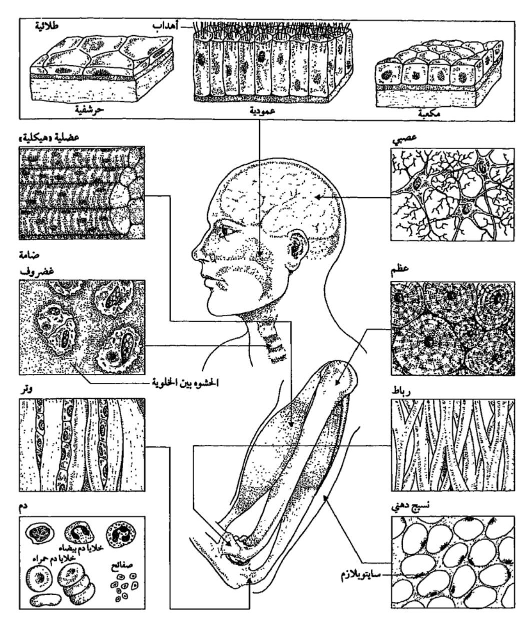
تنظم الخلايا المختلفة في الحيوانات إلى أنسجة، فيما يلي أنواع الأنسجة الموجودة في الحيوانات الفقارية (الشكل ٥-٢٧):

١- النسيج الطلائي EPITHELIAL

تتكون الأنسجة الطلائية من خلايا متراصة بجوار بعضها البعض ومرتبة في طبقات مفلطحة. وتبطن هذه الأنسجة الفراغات والأنابيب المختلفة في الجسم، كما أنها تكون الجلد الذي يغطي الجسم.

يقوم النسيج الطلائي بوظائف عديدة، في تلك الوظائف يوجد النسيج الطلائي دائما بين الكتل الخلوية والفراغات والتجاويف. ويحمي النسيج الطلائي للجلد الأنسجة الموجودة تحته من التأكلات الميكانيكية والأشعة فوق البنفسجية والجفاف والغزو البكتيري.

ويعمل النسيج الطلائي كذلك في نقل المواد من والى الأنسجة الأخرى والى



الشكل ٥-٢٧ . الأنسجة الحيوانية . كل نوع من الخلايا المبينة هنا متخصص في أداء وظيفة واحدة أو وظائف قليلة بكفاءة تاركا وظائف محددة للأنواع الأخرى . بذلك تكون كل الأنواع معتمدة على بعضها البعض وتفاعلها المنسق مع بعضها يتمخض عنه كائن عديد الخلايا .

الفراغات التي تفصلها تلك الأنسجة الطلائية . ويفرز النسيج الطلائي العمودي في الأمعاء إنزيمات الهضم في تلك الأمعاء كما يمتص المنتجات النهائية الناتجة عن هضم الغذاء من تلك الأمعاء . وجميع غدد الهضم في الجسم مبطنة بالنسيج الطلائي . ويبطن

النسيج الطلائي كذلك القنوات الهوائية وفراغات الرئة ، يفرز هذا النسيج موادا مخاطية ليحفظ نفسه من الجفاف ولإصطياد ذرات التراب التي إستنشقها الحيوان . وكثير من خلايا تلك الأنـابيب الهـوائية تحمل أهداب على جهتها الحرة وتدفع تلك الأهداب المخاط وما يحمله من المواد الغريبة إلى الخلف لأعلى الحلق . ولابد للخلايا الجنسية من الخروج من الجسم لأداء عملية التكاثر الجنسي ، تنشأ تلك الخلايا الجنسية كذلك من نسيج طلائي ماهو إلا النسيج الطلائي التكاثري .

٢- النسيج الضام: CONNECTIVE

يوجد الكثير من أنواع النسيج الضام في جسم الانسان ، وكل من هذه الأنسجة الضامة تتكون من خلايا منغمسة في مادة غيـر خلوية تسمى ماتركس Matrix وهي تفرز بواسطـة الخلايـا الضامـة نفسها . والنسيج الضام الدعامي (Supporting) يعطي القوة والـدعـامـة ويحمـي الأجـزاء الليـنة فـي الجسـم . وتمثـل الغضـاريف Cartilages والعظـام Bones المكونان الرئيسيان لهذا النسيج الضام في الأنسان . والمادة البينية في الغضروف هي مزيج من البروتين وعديدات التسكر ويطلق عليها إسـم الكوندريـن (Chondrin) وتأخذ الأذن الخارجية شكلها المعروف بسبب النسيج الضام الغضروفي . والنسيج البيني (الغير خلوي) في العظام يتكون من ألياف مكونة من كولاجين بروتيني ورواسب معدنية المكون الأساسي فيها هو فوسفات الكالسيوم ومعها أيونات المغنسيوم والكربونات والفلوريدات .

ويعمـل النسيـج الطـلائـي الرابـط Binding ، كما هو واضح من اسمه ، على ربط أجـزاء الجسـم ببعضهـا البعـض . فالأوتار (Tendons) توصل العضلات بالعظام ، المـادة البينية في الأوتـار بروتـين كولاجيني وتنغمس فيها الألياف متوازية مع بعضها البعض . والأوتار هذه غير مطاطة . وتوجد روابـط Ligaments تصل العظام بعضها ببعض ، بجـانب وجـود الألياف الكـولاجينية في تلك الروابط يوجد بها كذلك مادة إلاستين البروتين (Protein elastin).

والنسـيـج الضـام الليفي (Fibrous) يوجد موزعا على جميع أجزاء الجسم ، يعمل على ضم أو ربط المواد التي تتكون منها أعضاؤنا المختلفة ، يزودنا بممرات للأوعية الدموية والأعصاب لأمكانية الوصول اليها . وتوجد مادة الكولاجين وبروتينات أخرى

في المادة البينية Matrix لهذا النسيج الضام الليفي . ويوجد نسيج ضام ليفي آخر يسمي فاسكيا (Fascia) يربط العضـلات ببعضهـا البعض ويحكم إتصال الجلد بالأنسجة الموجـودة أسفلـه . والنسيـج الدهني (Adipose tissue) هو نسيج ضام وفيه إمتلات الخلايا عن آخرها تقريبا بالزيت.

ويوجد نسيج ضام دموي Hematopoietic وهو منشأ جميع الخلايا الموجودة بالدم مثل خلايا الدم الحمراء وخمسة أنواع من خلايا الدم البيضاء والصفائح الدموية. وتنقل خلايا الـدم الحمراء الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون في الدم. وتدافع خلايا الدم البيضـاء عن الجسم ضد أي دخيل غريب (مثـل الأصـابات البكتيرية). وتشجع الصفائح الدموية على تجلط الدم. ويعتبر نخاع العظام من النسيج الضام الدموي (Hematopoietic) وفيه تنتـج جميع الخـلايا الـدمـوية. وهنـاك نوعـان مـن الخـلايا الدمويـة البيضاء (الليموفوسايتس أو الخلايا الليمفاوية Lymphocytes والمونوساتيس Monocytes) تنتج أيضا من العقد الليمفاوية والطحال والغدة التيموسية.

٣- العضل: MUSCLE

توجد ثلاثة أنواع من الأنسجة العضلية في الأنسان. العضل الهيكلي أو الارادي Skeletal وتتكون من ألياف طويلة والتي عند إنقباضها يتسبب عنها الحركة وكذلك جميـع حـركات الجسـم الأراديـة. والعضل الأملس أو اللاإرادي Smooth يغلف جدر أعضاء الجسم المجوفة مثل الأمعاء والأوعية الدموية، وعند إنقباضها اللاإرادي تقلل من حجم أعضاء الجسم المجوفـة. وعضـلات القلـب (Cardiac) هي التي يتكون منها القلب.

٤- العصبي : NERVOUS

يتكون النسيج العصبي أساسا من خلايا عصبية (Neurons) وهي خلايا متخصصة في نقل الإحساسات أو النبضات الكهروكيميائية. وتتكون كل خلية عصبية من جسم الخلية الـذي يحتوي على النواة، ويخرج من هذا الجسم زائدة (محور) أو أكثر شعرية القـوام، وخـلال تلك الـزوائـد التي قد يزيد طول بعضهـا عن عدة أقـدام تنتقـل الإحساسات العصبية. وتتقابل أطراف تلك الزوائد مع خلايا عصبية أخرى (شكل

٥-٢٧) أو مع أي نسيج أخر (كعضل مثلا) يراد منه التأثر بالأحساسات الخارجة من الخلية العصبية.

ويتكون المخ والحبل الشوكي أساسا في الأنسان من نسيج عصبي، وجميع أجسام الخـلايا العصبية توجد في هذين العضوين. وتتجمع زوائد الخلايا العصبية في حزم مكونة الأعصاب (Nerves) التي تخرج من المخ والحبل الشوكي لتذهب إلى جميع أجزاء الجسم.

٥-٢٣ . الأنسجة النباتية PLANT TISSUES

إذا فحصنـا جسم نبـات وعائي بالغ لوجدنا عدة أنواع متميزة من الخلايا وهذه تتجمع مع بعضها في أنسجة وبعض هذه الأنسجة يتكون من نوع واحد من الخلايا والبعض الأخر يتكون من عدة أنواع.

١- الإنشائية MERISTEMATIC

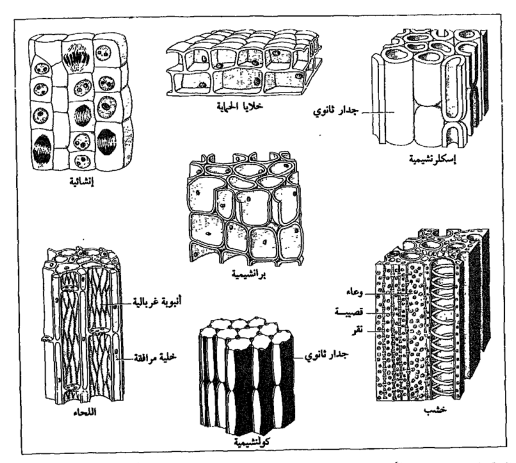
الـوظيفـة الأسـاسية للخـلايا الإنشائية (أو المرستيمية) هي الإنقسام غير المباشر (الشكل ٥-٢٨). الخلايا صغيرة رقيقة الجدر وبدون فجوة مركزية ولاتبدو عليها أية سمـات تخصصيـة. وهي توجد في أنسجـة (المرستيمات القمية apical meristems) عنـد القمم النـامية للجـذور والسـوق. في بعض النباتات توجد حلقة من النسيج الأنشائي (الكمبيوم cambium) في الساق البالغة. والأنقسام غير المباشر في الأنسجة الأنشـائية ينتـج خلايا جديدة لنمـو النبات. والخلايا الناتجة من الأنسجة الأنشائية لاتلبث أن تتشكل إلى واحد أو أكثر من أنواع الخلايا.

٢- أنسجة الحماية PROTECTIVE

خلايا أنسجـة الحـماية توجـد عنـد أسطح الجذور والسوق والأوراق وهي خلايا مفلطحة يكون السطح والقاع فيها متوازيان بينما الجوانب غير منتظمة (الشكل ٥-٢٨) وتقدم هذه الخلايا الحماية للخلايا التي تقع أسفلها.

٣- البرانشيمية PARENCHYMA

الخلايا البرانشيمية واسعة الأنتشار في النباتات. وهي خلايا كبيرة رقيقة الجدر وعادة



الشكل ٥-٢٨ . الأنسجة النباتية . كل نوع من الخلايا المتشكلة ينشأ من الخلايا التي تنتجها الأجزاء الانشائية . عدة خلايا إنشائية مبينة في حالة إنقسام غير مباشر .

مايكون بها فجوة مركزية . وكثيرا ماتصبح منفصلة عن بعضها جزئيا وتمتلىء المسافات البينية الناتجة بالغازات . وهي غنية بالبلاستيدات وفي الأجزاء غير المعرضة للضوء تسود بلاستيدات عديمة اللون ويصبح تخزين الغذاء هو الوظيفة الأساسية . وخلايا البطاطس خلايا برانشيمية . وفي الأجزاء المعرضة للضوء مثل الأوراق تسود البلاستيدات الخضر ويكون البناء الضوئي هو الوظيفة الأساسية .

٤- الكولنشيمة COLLENCHYMA

للخلايا الكولنشيمية جدر غليظة بصفة خاصة عند الأركان (الشكل ٥-٢٨) . وهذه الخلايا تدعم النبات وأكثر ماتوجد في أجزاء النبات التي تنمو بسرعة وتحتاج الى تقوية وعادة مايكون التدعيم في أعناق الأوراق بخلايا كولنشيمية .

٥- الأسكلرنشيمة SCLERENCHYMA

الخلايا الأسكلرنشيمية هي النوع الأكثر انتشارا من الخلايا التدعيمية وجدرها غليظة جدا وتكون على هيئة طبقة متجانسة تحيط تماما بحافة الخلية (الشكل ٥-٢٨). وعادة ماتوجد الخلايا الأسكلرنشيمية بصحبة أنواع أخرى من الخلايا وتكسبهم التدعيم وفي حالات كثيرة يموت بروتوبلاست الخلية الأسكلرنشيمية بعد إكتمال تكوين الجدار. توجد الخلايا الأسكلرنشيمية في الساق وكذلك تكون مصاحبة لعروق الأوراق وهي المكون الوحيد للأغلفة الصلبة الخارجية للبذور والثمار البندقية nuts.

٦- الخشب XYLEM

الخشب هو نسيج مختلط mixed tissue يتكون من عدة أنواع من الخلايا وأكثر هذه الأنواع تميزا وأهمية هو أوعية الخشب xylem vessels والقصيبات tracheids (الخشب في السرخسيات والصنوبريات يحتوي فقط على القصيبات). لأوعية الخشب جدر مغلظة ولا تترتب الجدر في طبقة متجانسة ولكنها عادة ماتأخذ شكل الشرائط الحلزونية (الشكل ٥-٢٨). وعندما يكتمل نمو الوعاء الخشبي تذوب الجدر الطرفية ويموت البروتوبلاست وينتج عن ذلك أنبوبة طويلة. وتختلف القصيبات عن الأوعية في أنها تفتقر الى الشرائط الحلزونية وتكون أطرافها مدببة وتتراكب الأطراف المدببة للقصيبات المرتبة رأسيا وتتصل ببعضها عن طريق العديد من النقر pits. وتستعمل الأوعية والقصيبات في نقل الماء والأملاح المعدنية من الجذور إلى الأوراق. في النباتات الخشبية يتوقف الخشب القديم عن المشاركة في عملية النقل ويعمل فقط على تدعيم جذع النبات النامي. وعندما يعد المرء الحلقات السنوية في شجرة فأنه يعد حلقات الخشب.

٧- اللحاء PHLOEM

اللحاء أيضا نسيج مختلط وأهم الخلايا فيه هي الأنابيب الغربالية sieve tubes وهي تسمى كذلك لأن الجدر الطرفية فيها تكون مثقبة (الشكل ٥-٢٨) مما يسمح بوجود إتصالات سيتوبلازمية بين الخلايا وهذا يساعد الخلايا على القيام بوظيفتها الرئيسية وهي نقل الغذاء والهورمونات إلى كل أجزاء النبات. وعند البلوغ لاتحتوي الأنابيب الغربالية على أنوية ولكن يوجد بجوارها خلايا مرافقة companion cells بها أنوية

وهـذه تتولى الهيمنة العامة على خلايا الأنابيب الغربالية. وكثيرا ماتوجد خلايا إسكلرنشيمية في نسيج اللحاء وتكسبه قدرا من التدعيم.

تنتظم الأنسجة النباتية نفسها في أنماط محددة. مجموعات الأنسجة المنتظمة مع بعضها تكون أعضاء organs النبات. والجذور والسوق والأوراق هي الأعضاء الرئيسية في النباتات الراقية ويتوقف أداؤها الصحيح لوظائفها على التنظيم والتناسق السليم للأنسجة التي تتكون منها.

٥-٢٤ . الاتصالات من خلية لخلية CELL-TO-CELL JUNCTIONS

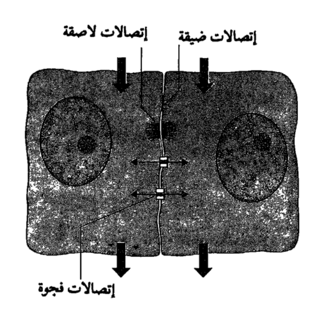
في أنسجة كثيرة مثل الأنسجة الضامة يوجد طلاء خارج الخلية يفصل بين غشاء الخلية وأغشية الخلايا المجاورة لها في نفس النسيج. وفي أنسجة معينة مثل الطلائية المبطنة للأمعاء تكون أغشية الخلايا المتجاورة مضغوطة إلى بعضها البعض عند عدة نقاط ويوجد من هذه الاتصالات ثلاثة أنواع.

١- إتصالات ضيقة TIGHT JUNCTIONS

الاتصالات الضيقة تغلق الخلايا الطلائية المتجاورة في شريط ضيق تحت السطح المكشوف للخلايا مباشرة ويحتمل أن يكون لهذه الأتصالات أهمية فسيولوجية كبيرة لأنها تعمل كحاجز يمنع مرور الجزيئات والأيونات بسهولة في المسافات بين الخلايا. فحيثما توجد اتصالات ضيقة يكون لزاما على المواد أن تدخل فعلا الى الخلايا ثم تمر من خلالها اذا كان لها أن تمر من خلال النسيج (الشكل ٥-٢٩). هذا الطريق يوفر بالتأكيد تحكم أكبر في المواد التي يسمح لها بالمرور عبرها اذا حدث انتشار بين الخلايا.

٢- الاتصالات اللاصقة ADHERING JUNCTIONS

كما يدل الاسم فان الاتصالات اللاصقة توفر تماسك آلي قوي بين الخلايا المتجاورة. بعض الاتصالات اللاصقة توجد على هيئة أشرطة ضيقة تصل مابين خليتين والبعض الآخر (ديزموسومات أو الأجسام الرابطة desmosomes) يوجد على هيئة حزم محددة تربط بين الخليتين.



الشكل ٥-٢٩. أنواع اتصالات الخلايا المميزة للطبقة الطلائية. الاتصالات اللاصقة توفر قوة التماسك للخلايا المتجاورة. الاتصالات الضيقة تمنع الجزيئات من الانتشار عبر المسافات البينية بين الخلايا الطلائية. اتصالات الفجوة تسمح للجزيئات الصغيرة والأيونات بالمرور بسهولة من خلية الى أخرى.

٣- اتصالات الفجوة GAP JUNCTIONS

تعمل إتصالات الفجوة كممرات للاتصال بين الخلايا. ومعروف منذ مدة أن الأيونات (ومن ثم التيارات الكهربية) والجزيئات (حتى وزن جزيئي حوالي ١٠٠٠ دالتون) تمر بسهولة من خلية إلى أخرى في أنسجة معينة ولكنها لاتمر بسهولة من هذه الخلايا إلى الخارج. وحديثا درس تركيب إتصالات الفجوة كيميائيا وتحت المجهر الاليكتروني. تحتوي هذه الاتصالات على قنوات بين خلوية قطرها حوالي ٢٠١,٦ نانومتر يمكن للأيونات والجزيئات الصغيرة أن تمر من خلالها بسهولة (في كلا الأتجاهين). والأنتشار الواسع لأتصالات الفجوة يعطي دليلا جديدا على أن الخلايا في الكائنات عديدة الخلايا ليست وحدات مستقلة ولكنها تكون قوالب البناء في نظام تعتمد أجزاؤه على بعضها البعض وهو النسيج.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

الخلية هي الوحدة التركيبية الرئيسية التي تتكون منها الكائنات الحية. وبعض الكائنات تتكون من خلية واحدة والبعض يحتوي على العديد من الخلايا. وجميع الخلايا لها غشاء خلوي. يوجد نوعان متميزان من الخلايا في الكائنات الحية. خلايا البكتريا والطحالب الخضراء المزرقة لاتحتوي على أنوية وليس فيها أي عضيات تحدها

أغشية ومثل تلك الخلايا تسمى بدائية النواة. خلايا جميع الكائنات الأخرى تكون حقيقية النـواة وتحتـوي على النـواة والعـديد من العضيات التي تحدها الأغشية مثل الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضر.

يعتمـد تركيب وحركة (إن وجدت) الخلايا حقيقية النواة على نظام من الألياف داخل الخلية ويشمل الخيوط الدقيقة والخيوط المتوسطة والأنابيب الدقيقة.

تتشكل خلايا الكائنات عديدة الخلايا الى عدد من الأنواع المتميزة ولكل نوع من الخلايا المتشكلة مظهر خاص ووظيفة أو قلة من الوظائف ليؤديها وعادة بروتين واحد أو أكثر مرتبط بهذه الوظائف. وتحدث الأتصالات بين الخلايا في الكائنات عديدة الخلايا بعدة طرق.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ ما هي أوجه الإختلاف بين الخلايا النباتية والخلايا الحيوانية ؟

٢ ــ أذكر جميع التراكيب الموجودة في خلية كبد الفأر والتي تتركب من أغشية.

٣ ــ كيف تختلف الخلايا بدائية النواة عن الخلايا حقيقية النواة ؟

٤ ــ ميزبين العضو والكائن والعضية.

٥ ــ بفرض أن لهم جميعا شكلا كرويا قارن بين مساحة السطح لكل من الميكوبلازما والبكتريا الكروية العنقودية وخلية من خد الأنسان (راجع الشكل ٥-١).

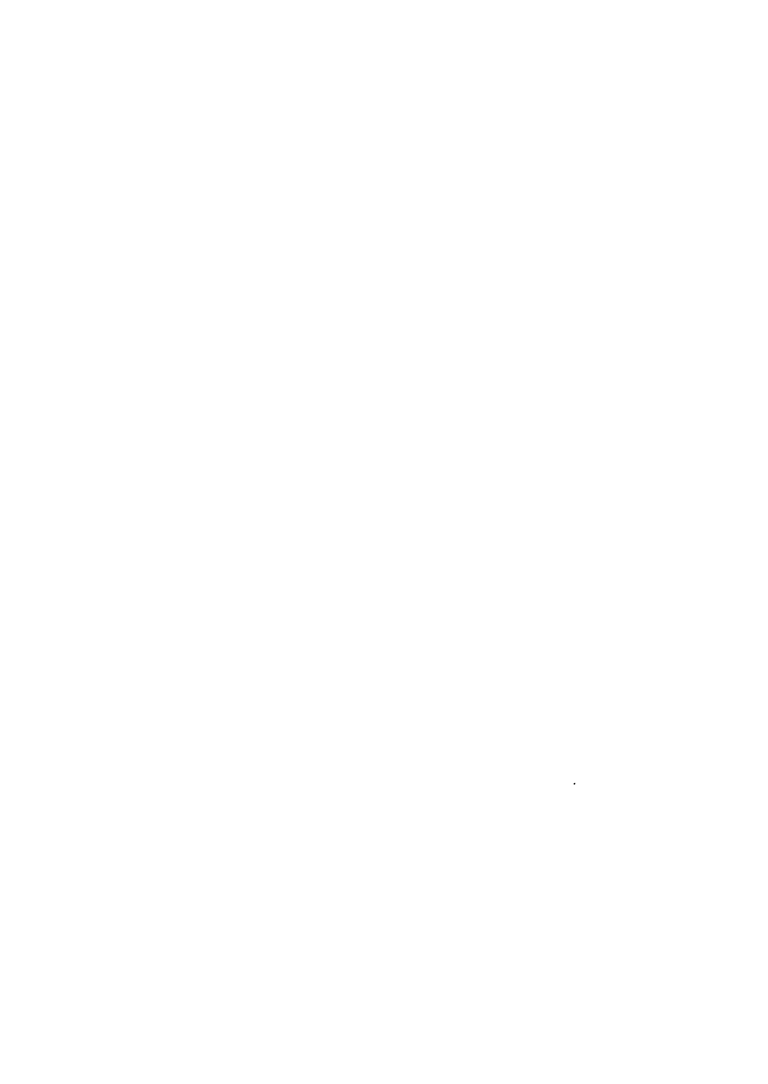
٦ ــ قارن بين أحجامهم إذا كانوا جميعا ذوى شكل كروي.

٧ ــ ما هي الجزيئات العضوية المستعملة في بناء:

(أ) جدار الخلية النباتية (ب) الكروموسومات
(ج) الريبوسوم (د) غشاء الخلية
(هـ) الليسوسوم (و) قطرة الزيت

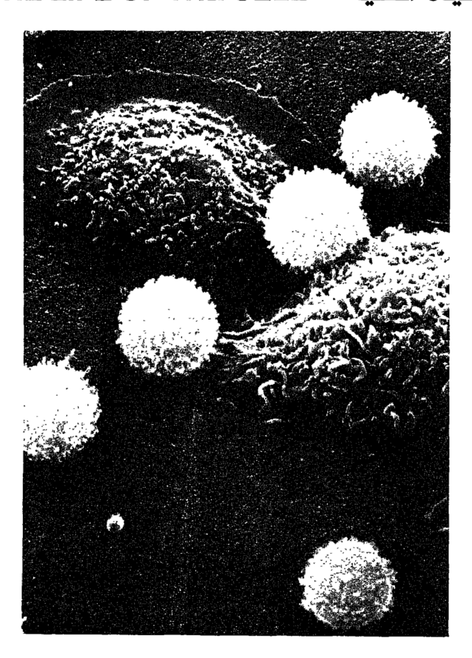
REFERENCES المراجع

1. PORTER, K. R., and J. B. TUCKER, "The Ground Substance of the Living Cell," Scientific American, Offprint No. 1494, March, 1981. How new techniques of electron microscopy reveal a meshwork that connects and organizes the various cytoplasmic organelles.
2. LODISH, H. F., and J. E. ROTHMAN, "The Assembly of Cell Membranes," Scientific American, Offprint No. 1415, January, 1979. How the asymmetric nature of cell membranes is established and preserved.
3. COOK, G. M. W., The Golgi Apparatus, Oxford Biology Readers, No. 77, Oxford University Press, Oxford, 1975.
4. ALLISON, A.C., Lysosomes, Oxford Biology Readers, No. 58, Oxford University Press, Oxford, 1974.
5. JORDAN, E.G., The Nucleolus, Oxford Biology Readers, No. 16, Oxford University Press, Oxford, 1971.
6. LAZARIDES, E., and J.P. REVEL, "The Molecular Basis of Cell Movement", Scientific American, Offprint No. 1427, May, 1979. Describes the central role played by microfilaments in cell motility.
7. LOEWENSTEIN, W.R. , "Intercellular Communication", Scientific American, Offprint No. 1178, May, 1970. Describes experiments showing the physiology of cell-to-cell junctions.
8. DUSTIN, P., "Microtubes," Scientific American, Offprint No. 1477, August, 1980.
9. STAEHELIN, L. A., and B. E. HULL, "Junctions Between Living Cells," Scientific American, Offprint No. 1388, May, 1978. Includes excellent electron micrographs showing the structure of the various cell-to-cell junctions.



PART III القسم الثالث

THE LIFE OF THE CELL حياة الخلية



صورة بالمجهر الأليكتروني المساح لخلايا ليمفاوية (الخلايا الأصغر الكروية) والخلايا الأكولة (عن ج.م. أورنشتاين و إي. شيلتون)



CHAPTER 6 الباب السادس

الأيض في الخلايا

THE METABOLISM OF CELLS

الباب السادس

الأيض في الخلايا

الخلية هي آلة كيميائية. وهي تكتسب المواد والطاقة من الوسط المحيط بها وتقوم بتحويل هذه المواد بداخلها بواسطة الأنشطة الكيميائية التي تشكل في مجموعها أيض الخلية وفي النهاية تقوم باعادة بعض النواتج النهائية لهذه الأنشطة الكيميائية الى البيئة.

٦-١. بيئة الخلية THE CELLULAR ENVIRONMENT

ماهي بيئة الخلية ؟ هي دائما سائل. يبدو ذلك واضحا تماما إذا نظرنا إلى الأميبا في إحدي البرك. وقد لا يكون ذلك واضحا بنفس القدر اذا نظرنا الى كائن أرضي عديد الخلايا مثل شجرة بلوط أو إنسان. ولكن في هذه المخلوقات أيضا تكون كل خلية حية منغمسة في سائل. خلايا جسمك على سبيل المثال تكون منغمسة في السائل البيني interstitial fluid المستمد من الدم. ولكنك قد تسأل: ماذا عن الجلد؟ خلايا جلدك المعرضة للجو الخارجي هي خلايا ميتة ولا نجد خلايا جلد حية إلا تحت هذه القشرة الخارجية الميتة وهذه الخلايا الحية مثل كل الخلايا الحية الأخرى تكون منغمسة دائما في سائل. وفي الواقع فحيثما تكون هناك خلايا حية معرضة للجو الخارجي (كما في الطبقة الطلائية المبطنة للممرات الهوائية وفي القرنية الشفافة في مقدمة عينيك) تعمل خلايا افرازية على غمس الأسطح المعرضة في مدد دائم من الرطوبة. والاسم العام للسائل - أيا كان مصدرة - الذي تنغمس فيه الخلايا هو السائل خارج الخلايا extracellular fluid (ECF). كل جزيء أو أيون تحتاجة الخلية يتم تأمينة من السائل خارج الخلايا وكل النواتج أو النفايات التي تقوم الخلية بتصنيعها تترسب في السائل خارج الخلايا.

٦-٢ . تركيب السائل الموجود خارج الخلايا
THE COMPOSITION OF THE ECF

المادة الاساسية في تركيب السائل خارج الخلايا هي الماء. في هذا المذيب الرائع تذوب الجزيئات والأيونات التي تعتمد عليها الخلايا في أداء وظائفها. وهذه تشمل:

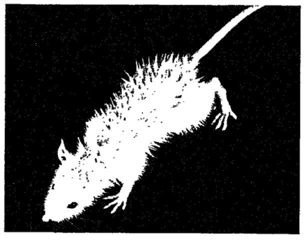
١- **الغازات** gases. وأهمها الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون.

٢- **تشكيلة من الأيونات غير العضوية** inorganic ions يوجد منها الصوديوم (Na^+) و الكلوريد (Cl^-) والبوتاسيوم (K^+) والكالسيوم (Ca^{++}) والبيكربونات (HCO_3^-) والفوسفات ($PO_4^{\equiv}$) بكميات كبيرة. وهناك عدد من الأيونات غير العضوية الأخرى يكون مطلوبا بكميات قليلة فقط. وفي بعض الحالات مثل النحاس Cu^{++} والزنك Zn^{++} والمنجنيز Mn^{++} و الكوبالت Co^{++} تكون هذه العناصر الصغيرة ضرورية لنشاط إنزيمات معينة. اليود يدخل في تركيب هورمون الثيروكسين. كميات قليلة من أيون الفلوريد (F^-) تكون هامة لتقوية أجزاء من الأسنان والعظام كما تكون أساسية للنمو الطبيعي في الفئران (الشكل ٦-١).

٣- **مركبات عضوية مثل الأغذية** Foods **والفيتامينات** Vitamins. الأغذية هي تلك المواد التي تعمل كمصدر للطاقة اللازمة للخلية وكذلك مصدر للمواد اللازمة لنمو وإصلاح الخلية. وهي تشمل الليبيدات والأحماض الأمينية والسكريات. أما الفيتامينات فهي جزيئات عضوية صغيرة لا يستطيع الكائن تصنيعها من غذائه ويحتاج اليها بكميات قليلة جدا. وهي لاتستعمل كمصدر للطاقة أو لبناء الخلية وبدلا عن ذلك تقوم بأداء مهام معينة في الخلية. فمثلا يعمل بعضها كمجموعة فعالة لأحد الانزيمات.

بالاضافة الى هذه المكونات الثلاثة يحتوي السائل خارج الخلايا في الكائنات عديدة الخلايا على الهورمونات hormones. وهذه عبارة عن جزيئات تطلقها خلايا معينة في السائل خارج الخلايا وتؤثر على الأنشطة الأيضية للخلايا الأخرى. يعمل السائل خارج الخلايا أيضا على إبعاد النفايات الاخراجية للخلايا. بالنسبة للحيوانات تكون أهم هذه النفايات هي نواتج أيض البروتينات والأحماض النووية. هذه النفايات المحتوية



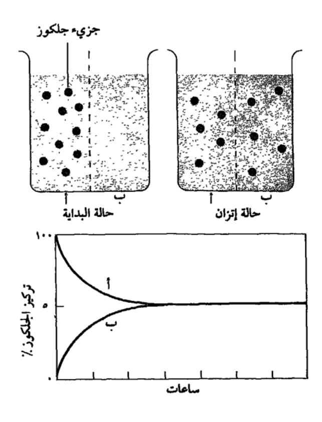


الشكـل ٦-١. الحـرمان من العنـاصر الأثـريـة. الفـأر في الصورة السفلي تلقي نفس غذاء الفـأر في الصـورة العليـا مع الاستبعـاد التـام للقصـديـر والفاناديوم وأملاح الفلوريد لمدة ٢٠ يوم. عنـد إعـطاء القصدير والفاناديوم للفأر المحروم لم يحدث النمو الطبيعي ولكن عند إضافة ٥ر٠ جزء في المليون من فلوريد البوتاسيوم إلى غذائه إسترد نموه وصحتـة العادية. (بتصريح من كلاوس شوارتـز-مستشفى إدارة البيطريين - لونج بيتش - كاليوفورنيا).

على النتروجين مثل الأمونيا واليوريا تكون سامة ولا يجب السماح بارتفاع تركيزها في السائل خارج الخلايا عن حد معين.

تركيز أيون الهيدروجـين (pH) ودرجـة حرارة السائل خارج الخلية لهما أهمية كبيرة بالنسبة لحالة الخلية. اذا خرج الأس الهيدروجيني للدم في الانسان عن المدى ٧,٣٤ - ٧,٤٤ فانه يترتب على ذلك متاعب أيضية خطيرة. وبالمثل تتم المحافظة على درجة حرارة السائل خارج الخلايا في الانسان عادة عند ٣٧,٥°م (٩٨,٦° ف).

لنـدرس الان وسائل تبادل المواد بين الخلية والسائل خارج الخلايا. توجد خمس آليات معروفة لحدوث هذ التبادل: الانتشار - الأوزموزية - النقل - خروج المواد من الخلية (exocytosis). دخول المواد إلى الخلية (endocytosis).



الشكـل ٦-٢. جهاز لقياس إنتشـار الجـزيئات الصغيرة عبر غشـاء من السيلوفان. عند بدء التجـربـة تكـون كل جزيئـات الجلوكـوز في القسم أ وبمـرور الـوقت يتسبب إنتشار الجلوكوز في نقص تركيزه بالقسم أ وبنفس المقـدار زيـادتـة في القسم ب. وبعـد ثلاث سـاعـات يتسـاوي التركيزان وتحدث حالة اتزان.

٦-٣. الانتشار Diffusion

قسم غرفـة الى جزئـين بواسـطة غشاء من السلوفان (الشكل ٦-٢). إملأ أحد الجـزئـين (أ) بمحلول الجلوكـوز (أو أي جزيء صغير أو أيون يمكن قياس تركيزة بسهولة). إملأ الجزء الآخر (ب) بالماء النقي ثم خذ عينة من كل جزء كل عدة دقائق وقس تركيز الجلوكوز في كل منها. سوف تجد أنه بمرور الوقت ينخفض تركيز الجلوكوز في الجزء (أ) وبنفس القدر يرتفع تركيزة في الجزء (ب). وفي النهاية يأتي وقت تتساوى فيه التركيزات في الجزئين (الشكل ٦-٢) وتظل على هذا الحال.

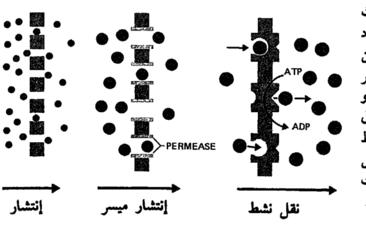
الـظاهـرة التي كنت تراقبهـا هي الانتشار. وهي تحدث بسبب الحركة العشوائية المستمـرة المميزة لكـل الجزيئات التي لاتتقيد مع بعضها في مادة صلبة. يتحرك كل جزيء في خط مستقيم حتى يصطدم مع جزيء آخر (جزيء جلوكوز أو ماء أو سيليلوز من غشاء السيلوفان في هذه الحالة). ويلي كل تصادم إنحراف الجزيء في اتجاة آخر وتكـون النتيجـة حركـة عشـوائية للجزيء. وفي بداية إمتلاء الأجزاء تؤدي الحركة

العشـوائية لجزيئات الجلوكوز الى تصادمات عديدة مع غشاء السيلوفان. ومع ذلك توجد في الغشاء ثقوب كبيـرة بالقدر الذي يسمــح بمرور جزيـئات الجلوكوز وبـذلك تمــر الجزيئات المنحرفــة في إتجاه هـذه الثقوب إلى الجـزء (ب) . وكلما أخذ تركيـز الجلوكـوز يتزايـد في الجـزء (ب) نتوقع أن تبـدأ هـذه الجزيئـات في العـودة وهذا مايحـدث بالفـعل ولكـن طالمـا كان هناك فرق في التركيز concentration gradient عبر الغشاء - أي طالما كان تركيز جزيئات الجلوكوز في الجزء (أ) أعلى منه في الجزء (ب) تكون هناك محاولات أكثر لاختراق السيلوفان من الجانب (أ) الى الجانب (ب) وتستمر محصلة حركة جزيئات الجلوكوز من (أ) الى (ب). وعندما تصبح التركيزات متساوية تكون سرعة الانتقال بين (أ) ، (ب) في الاتجاهين متساوية وحينئذ تصل الى حالة اتزان equilibrium (الشكل ٦-٢).

لاتعتمد سرعة إنتشار المواد خلال غشاء الخلية على فرق التركيز عبر الغشاء فقط وانما على حجم وشحنة الدقائق المعنية وقابليتها للذوبان في الليبيدات (أي الكارهة للماء) عبر الأغشية بسهولة أكثر من إنتشار الجزيئات المحبة للماء. أغشية الخلايا تكون أقل نفاذيـة بالنسبـة للأيونـات (مثل الصوديـوم Na^+ والكلوريد Cl^- والبوتاسيوم K^+) عنها بالنسبـة للجـزيئاتِ الصغيرة التي لا تحمل شحنات. واذا تساوت كل الظروف فان الجزيئات الصغيرة تنتشر عبر الغشاء الخلوي أسرع من الجزيئات الكبيرة. وفي الواقع فان الانتشار البسيط للجزيئات المحبة للماء التي تزيد عن ٧-٨ وحدات أنجستروم يتوقف بالكامل تقريبا عند غشاء الخلية. ومع ذلك تستطيع تلك الجزيئات النفاذ الى داخل الخلية واحدى طرق هذا النفاذ هي الانتشار الميسر.

الانتشار الميسر FACILITATED DIFFUSION

تختلف أغشية الخلية عن لوح السيلوفان في أن نفاذيتها متغيرة variable. حينما تنتقل بكتيريا القولون العادية *E. coli* من وسط يحتوي على الجلوكوز الى وسط يحتوي على اللاكتوز فسرعان مايتباطأ الأيض فيها. وأحد أسباب ذلك أن غشاء الخلية عادة يكون غير منفذ للاكتوز. ومع ذلك فبعد بضع دقائق يبدأ اللاكتوز في الدخول إلى الخلية بفضل ظهور إنزيم البرمياز permease في غشاء الخلية. إنزيم البرمياز عبارة عن بروتين موجود في غشاء الخلية ويعمل كوسيلة تعبر بها جزيئات اللاكتوز الطبقة المزدوجة من



الشكل ٦-٣. ثلاث آليات لدخول وخروج المواد من الخلايا. في كل من الانتشار والانتشار الميسر تنتقل الدقائق (جزيئات أو أيونات) مع إتجاه فرق تركيزها. في النقل النشط تتحرك الدقائق في عكس إتجاه فرق تركيزها وذلك يتطلب من الخلية بذل طاقة.

الليبيدات الكارهة للماء في غشاء الخلية. الانتشار الذي يعتمد على آليات إنتقال غشائية خاصة مثل البرمياز يسمي الانتشار الميسر (الشكل ٦-٣). إنتشار الأدينوزين ثنائي الفوسفات (ADP) إلى داخل الميتوكوندريا وانتشار الأدينوزين ثلاثي الفوسفات (ATP) إلى خارج الميتوكوندريا أيضا يتطلب الانتشار الميسر. في جميع حالات الانتشار الميسر تتحرك الجزيئات في إتجاه فرق التركيز بينها أي في الاتجاه الذي كانت سوف تسلكه لو كان الغشاء منفذا لها. ومع ذلك تستطيع الأغشية الخلوية أيضا أن «تضخ» المواد ضد فرق تركيزها كما سوف نرى في القسم ٦-٥.

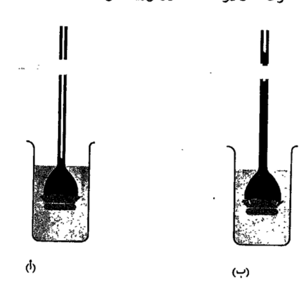
٦-٣. الأوزموزيـة OSMOSIS

الأوزموزية هي ببساطة حالة خاصة من حالات الانتشار. يعرف الكيميائيون الأوزموزية بأنها إنتشار أي مذيب خلال غشاء إنتخابي النفاذية. أغشية الخلية التي تسمح بمرور بعض الجزيئات وتمنع مرور جزيئات أخرى هي أغشية إنتخابية النفاذية. المذيب العام في الكائنات الحية كما ذكرنا من قبل هو الماء. ولذلك يمكن تعريف الأوزموزية بأنها انتشار الماء عبر غشاء إنتخابي النفاذية من منطقة تركيز عالي إلى منطقة تركيز منخفض. لاحظ أن التركيز هنا يشير إلى تركيز المذيب (أي الماء) وليس تركيز الذائبات (الجزيئات والأيونات) التي قد تكون ذائبة في الماء. تبادل الماء بين الخلية والوسط المحيط بها من الأهمية بحيث يستحق إسما خاصا هو الأوزموزية.

تجربة لتوضيح الأوزموزية مبينة في الشكل (٦-٤). الفتحة السفلية للأنبوبة

الـزجـاجية مغـطاة بغشاء من السيلوفان يعمل كغشاء إنتخابي النفاذية حيث يسمح بالمرور السريع لجزيئات الماء ويعترض مرور الجزيئات الأكبر. تمتلىء الأنبوبة بالمولاس وهو محلول مركز من السكر في الماء ثم توضع في كأس به ماء مقطر. في أي اتجاه تحدث الأوزموزية؟ تركيز الماء في الكأس هو ١٠٠٪ وتركيز الماء داخل الأنبوبة أقل من ذلك لأن أي حجم من محلول المولاس يحتوي على عدد أقل من جزيئات الماء الموجودة في نفس الحجم من الماء المقطر. هناك اذن محصلة لحركة جزيئات الماء عبر غشاء السيلوفان إلى داخل الأنبوبة.

كلما دخـل المـزيد من جزيئات الماء الى داخل الأنبوبة إزداد حجم المحلول بها، فيندفع صاعدا إلى أعلى. هذا الاندفاع ينشأ من الضغط الناجم عن إنتشار جزيئات الماء الى داخل الأنبوبة. هذا الضغط يسمى بالضغط الأوزموزي Osmotic pressure. كلما زاد الفرق في تركيز الماء على جانبي الغشاء زاد الميل الى حدوث الأوزموزية وكلما زاد الضغط الأوزمـوزي. وفي الواقع فانه عندما يتوقف عمود المولاس عن الإرتفاع يكون لدينا مقياس تقريبي للضغط الأوزموزي في هذا النظام. الضغط الناشىء عن وزن عمود الماء يعادل في النهاية الضغط الأوزموزي وتتوقف الأوزموزية. لاحظ أن تركيز الماء مايزال غير متساوي على جانبي الغشاء. ومع ذلك فان زيادة الضغط على السطح الداخلي للغشاء والناشئة عن وزن عمود المولاس فوقها تتسبب في دفع جزيئات خلال المسام وعندما تساوي سرعة عملية الدفع هذه سرعة وصول جزيئات الماء بسبب فرق التركيز فان ا لأوزموزية تتوقف.



الشكـل ٦-٤. مقياس الأوزموزية (أوزمومتر). (أ) في البداية. (ب) بعد بضع ساعات. السيلوفان غشاء إنتخابي النفاذية ويمر الماء من خلالـه أسهل من مرور جزيئات السكر.

عند وضع خلايا دم حمراء من الانسان في ماء نقي تبدأ جزيئات الماء في الانتشار الى داخل هذه الخلايا. تحدث هذه الأوزموزية لأن هناك تركيز أكبر للماء (١٠٠٪) خارج الخلايا عن داخلهـا . الماء المحيـط بالخلايا يسمى ناقص التوتر hypotonic بالنسبة لسيتـوبلازم الخلايا. غشاء الخلايا الحمراء هش للغاية ولايستطيع أن يتحمل تزايد الضغط عليه من داخل الخلية فتتفجر الخلية.

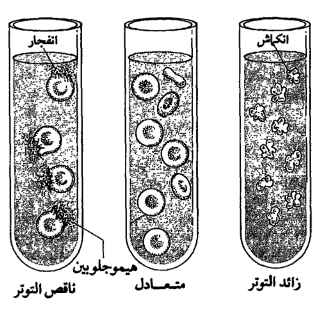
إذا وضعت الخلايا الحمراء في ماء البحر يخرج الماء من الخلايا بواسطة الأوزموزية وتنكمش الخلايا (الشكل ٦-٥) وذلك لأن حجم معين من ماء البحر يحتوي على عدد من جزيئات الماء أقل مما يحتوية نفس الحجم من سيتوبلازم الخلايا الحمراء. يسمى ماء البحر زائد التوتر hypertonic بالنسبة لسيتوبلازم الخلايا.

حينـما توضـع الخـلايا الحمـراء في وسط يحتـوي على تركيز ماء مسـاوتمـاما لما في السيتـوبلازم (مثل بلازما الدم أو محلول تركيزة ٠,٩٪ من كلوريد الصوديوم) فانها لاتكتسب ولا تفقد الماء بالأوزموزية. مثل هذا المحلول يسمى متعادل التوتر isotonic .

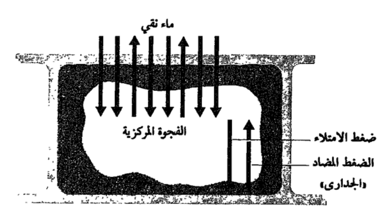
تحمل الأوساط ناقصة التوتر وزائدة التوتر

COPING WITH HYPOTONIC AND HYPERTONIC ENVIRONMENTS

ماذا عن الكائنات التي تقضي حياتها في المياه العذبة؟ من المؤكد أن تركيز الماء في



الشكل ٦-٥. تأثير الأوساط المحتـوية على تركيـزات أعلى (نـاقص التـوتـر) ومتسـاوية (متعادل) وأقل (زائد التوتر) من المـاء من تركيز الماء في محتويات خلايا الدم الحمراء.

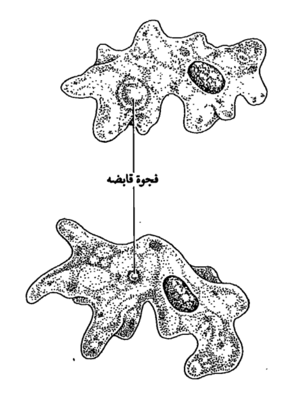


الشكل ٦-٦ الامتلاء في خلية نباتية. عندما يتساوي الضغط داخل الخلية مع الضغط الأوزموزي يصل مرور الماء من وإلى داخل الخلية الى حالة اتزان.

السيتوبلازم لايمكن أن يقترب من تركيز الماء النقي المحيط بها. في حالة خلايا نباتات المياه العذبة يدخل الماء إلى الخلية بالأزموزية. كلما إزدحمت الخلية بمزيد من الجزيئات تبدأ محتويات الخلية في الضغط على جدار الخلية. هذا الضغط يسمى ضغط الامتلاء Turgor Pressure (الشكل ٦-٦). تستطيع الجدر السيليلوزية للخلايا تحمل هذا الضغط وبسرعة يتساوي ضغط الامتلاء داخل الخلية مع الضغط الأوزموزي حتى ولو لم تكن تركيزات الماء على جانبي الغشاء متساوية.

غالبا ما تحتوي الفجوات المركزية للخلايا في النباتات الأرضية على تركيز مرتفع من المواد الذائبة. يدخل الماء الممتص من التربة إلى الخلايا وينشأ بها ضغط إمتلاء. هذا يؤدي إلى تصلب جدار الخلية. ضغط الإمتلاء في جدر جزء غير خشبي من النباتات مثل ورقة أو بتلة زهرة أو ساق عشبية يؤدي إلى التصلب. حينما لاتستطيع النباتات الأرضية تأمين كميات كافية من الماء من التربة تفقد خلاياها ضغط الامتلاء ويذبل النبات.

حيوانات المياه العذبة والحيوانات الأولية ليس لها جدر سيليلوزية وعليها أن تجابه الحياة في وسط ناقص التوتر بطريقة مختلفة. يدخل الماء إلى خلاياها باستمرار بالأوزموزية ولكن لاينشأ بها إلا ضغط إمتلاء قليل. يتم حل المشكلة باستخدام قدر من الطاقة وتركيب انقباضي لاعادة ضخ الماء الزائد مرة أخرى إلى خارج الخلية. تنجز الأميبا وحيدة الخلية ذلك بواسطة فجوة قابضة (الشكل ٦-٧) يتجمع فيها الماء الداخل إلى الخلية بالأوزموزية وعندما تمتلىء الفجوة فانها تنقبض (بمساعدة الأنابيب الدقيقة) لتدفع الماء إلى الخارج من خلال ثقب يتكون لحظيا في غشاء الخلية. لاحظ أن الماء الذي دخل الخلية كنتيجة للنشاط الجزيئى العشوائي للأوزموزية يغادر الخلية بسبب



الشكل ٦-٧. تتخلص الأميبا من التـدفق الـدائم للماء من الـوسط ناقص التوتر المحيط بها عن طريق تبـادل ملء وتفـريـغ فجـوتها القابضة. يمكن تفريغ محتـويـات الفجوة عند أي نقطة على سطح الخلية.

قوة تولدت في الخلية. وتوليد هذه القوة يتطلب بذل الخلية لبعض الطاقة. في الباب ٣٢ سوف ندرس بعض الاليات التي تجابـه بها حيوانـات المياه العذبة مثل الأسماك البيئات ناقصة التوتر.

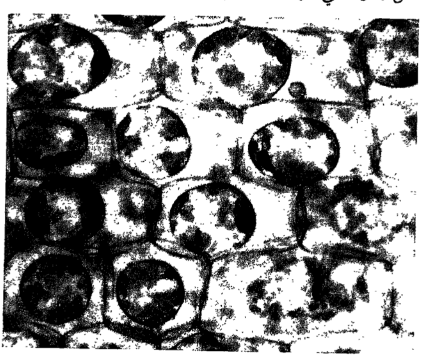
الحياة في المحيطات لها ظروف أوزموزية مختلفة تماما عنها في المياه العذبة، فماء البحر يحتوي على حوالي ٣,٥٪ أيونات مختلفـة وخاصة Na^+ و Cl^-. وهذا يؤدي إلى تركيز ماء يساوي تقريباً تركيز الماء في سيتوبلازم النباتات البحرية واللافقاريات التي تعيش في البحر. وعلى ذلك فان هذه الكائنات تستطيع أن تعيش في حالة إتزان فيما يتعلق بالماء في الوسط المحيط بها. فهي لا تكتسب ولا تفقد الماء بالأوزموزية لأن ماء البحر متعادل التوتر بالنسبة لسيتوبلازمها.

إذا كان تركيز الملح في ماء البحر هو ٣٪ بالوزن وبالتالي تركيز الماء ٩٧٪ فان ذلك لايعني أن تركيز الماء في سيتوبلازم هذه النباتات والحيوانات البحرية هو ٩٧٪ بالوزن كذلك السرعة التي يحدث بها الانتشار أو الأوزموزية هي مقياس للاختلاف في عدد وليس في وزن الجـزيئـات أو الأيونات المنتشرة. حينما تحدث الأوزموزية فان منطقة

التركيز الأعلى هي ببساطة المنطقة التي تحتوي على العدد الأكبر من جزيئات الماء في حجم معين من المخلوط. وقد يحتوي سيتوبلازم هذه الكائنات البحرية على كمية تصل في ضآلتها إلى ٨٠-٩٠٪ بالوزن من الماء. ومعظم ما تبقى في السيتوبلازم يتكون من البروتين. هذه الجزيئات الكبيرة تشكل جزءا كبيرا من وزن السيتوبلازم ولكن تساهم بجزء ضئيل من التأثير الأوزموزي بسبب قلة عدد جزيئاتها.

وبالمثل فان محلول ملح تركيزة ٩,٠٪ (أي ٩٩,١٪ ماء) يكون متعادل التوتر بالنسبة لبلازما دم الانسان على الرغم من أنها تحتوي على ٩٠٪ فقط بالوزن من الماء ولكن عدد جزيئات الماء في حجم معين من كل منهما متساو.

عند وضع نبات مياه عذبة (أو أرضى) في ماء البحر فسرعان ما تفقد خلاياه إمتلاءها ويذبل النبات إذ أن ماء البحر زائد التوتر بالنسبة للسيتوبلازم. وكلما إستمر إنتشار الماء من السيتوبلازم إلى ماء البحر تنكمش الخلية تدريجيا. هذه الحالة تعرف باسم البلزمة plasmolysis. لاحظ في الشكل (٦-٨) كيف أن محتويات الخلايا قد تباعدت عن جدرها التي مازالت محتفظة بأشكالها الأصلية.



الشكل ٦-٨. خلايا متبلزمة في نبات المياه العذبة إلوديا الذي وضع في ماء البحر. الحيز الموجود بين أغشية الخلية وجدار الخلية أصبح ممتلئا بماء البحر.



الشكـل ٦-٩. غدد الملح في نورس الـرنجـة. السـائل الذي تفرزة الغدد أكثر ملوحة من الدم.

في الأسماك العظمية يكون تركيز الماء في السائل المحيط بالخلايا أعلى بكثير منه في ماء البحر وعلى ذلك فانها تعيش في وسط زائد التوتر. وبينما يكون على كائنات المياه العـذبـة أن تواجـه المرور المستمر للماء إلى داخل أجسامها بالأوزموزية فان الأسماك العظمية في الماء المالح عليها أن تفقد الماء باستمرار بالأوزموزية. مرة أخرى تعتمد النجاة على بذل الطاقة لمقاومة قوة الأوزموزية. تشرب الأسماك ماء البحر ثم تستغل الـطاقة الأيضية للتخلص من الملح وتطلق الملح إلى البيئة الخارجية عند الخياشيم. الطيور البحرية التي قد تقضى فترات طويلة من الزمن بعيداً عن المياه العذبة وكذلك سلاحف البحـر تستعمـل أسلوبـا مشـابهـا. فهي أيضـا تشرب ماء البحر لاشباع إحتياجاتها المائية ثم تستغل الطاقة الأيضية لنزع الملح منه ثم يتم إستخلاص الملح بواسـطة غدتين في الرأس ويطلق (في محلول مركز جدا) إلى الخارج خلال فتحات الأنف (الشكل ٦-٩). كذلك تلجأ الثعابين البحرية إلى وسيلة مشابهة لنزع الملح.

٦-٥ . النقل النشط ACTIVE TRANSPORT

يحتوي سيتوبلازم خلايا الدم الحمراء في الانسان على تركيز أيونات البوتاسيوم يبلغ ٣٠ ضعف التركيز الموجود في السائل المحيط بها (بلازما الدم). من ناحية أخرى تحتوي بلازما الدم على تركيز أيونات الصوديوم يبلغ حوالي ١١ ضعف التركيز الموجود في الخلايا الحمراء. حتى لو كان إنتشار هذه الأيونات عبر غشاء الخلية بطيئا فكيف يمكن أن نفسر هذه الإختلافات الكبيرة في التركيز ؟ إذا قمنا بتبريد الخلايا الحمراء أو حرمناها من الجلوكوز أو عاملناها بمادة سامة تعطل إنطلاق الطاقة داخل الخلية فان البوتاسيوم يأخذ في التسرب إلى الخارج (بالانتشار) كما يبدأ الصوديوم في التسرب الى الداخل حتى يصل إلى مرحلة إتزان. وإذا عكسنا أي من الخطوات المعطِّلة السابقة

فان ذلك سيدفع هذه الأيونات إلى التحرك مرة أخرى في عكس إتجاه فرق التركيز. هذه الحركة للأيونات والجزيئات ضد فرق التركيز تسمى بالنقل النشط. ويوصف بالنشط لأنه - كما يتضح من التجارب السابقة - لابد للخلايا من بذل طاقة كي يتم النقل ضد القوي السلبية للانتشار.

قدرة الخلايا على النقل للأيونات والجزيئات من والي السائل المحيط بها واسعة الانتشار. عادة تحتوي الكائنات البحرية على أيونات معينة في السيتوبلازم بتركيزات تبلغ ألف ضعف أو أكثر عما هو موجود في ماء البحر المحيط بها. كذلك تستطيع الخلايا المبطنة الأمعاء أن تقوم بالنقل النشط للجلوكوز من التركيز الأقل في محتويات للأمعاء إلى التركيز الأعلى في الدم.

الآلية الفعلية التي يحدث بها النقل النشط مازالت محل بحوث مستفيضة. ومع ذلك فمن الواضح أن عملية الضخ إلى أعلى هذه تتطلب بذل طاقة كما أنها تتطلب وجود إنـزيمات في أغشية الخلية تعمـل على نقـل الجـزيئـات والأيونات من جانب التركيز المنخفض إلى جانب التركيز المرتفع. واحد من أكثر إنزيمات النقل النشط إنتشارا يكون مسئـولاً عن ضخ أيونـات الصـوديوم إلى خارج الخلية وضـخ أيونات البوتاسيوم إلى داخلها. ولكي يعمل هذا الانزيم كمضخة لابد أن تتوفر فيه عدة مميزات. أولا لابد للانزيم أن يوجد به موقع ترتبط به الأيونات المنقولة. ثانيا لابد أن يكون الأنزيم قادرا على نقل الأيون من أحد جانبي غشاء الخلية إلى الجانب الآخر (الشكل ٦ - ٣). ثالثا لابد أن يكون إرتباط الإنزيم بالأيون أقوى في الجانب الذي ينتقل منه الأيون وأضعف في الجانب الذي ينتقل إليه الأيون. وأخيراً مطلوب وسيلة لامداد الطاقة التي تؤدي إلى حدوث هذه التغيرات. الطاقة اللازمة لتشغيل مضخة الصوديوم والبوتاسيوم تأتي من الأدينوزين ثلاثي الفوسفات (ATP).

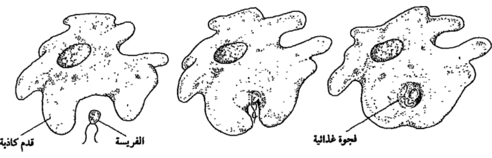
هناك العديد من المواد الأخرى مثل بعض السكريات والأحماض الأمينية يحدث لها النقل النشط إلى داخل الخلايا. في بعض الحالات يتم إمداد الطاقة اللازمة لذلك من فارق التركيز لأيونات الصوديم الذي تحدثه مصخة الصوديوم - بوتاسيوم. بمساعدة بروتين خاص بالنقل تدخل جزيئات الجلوكوز وأيونات الصوديوم إلى الخلية معا. وبعد ذلك يتم ضخ الصوديوم مرة أخرى إلى الخارج بواسطة مضخة الصوديوم - بوتاسيوم.

وعـلى ذلـك فإن مضخـة الصوديوم - بوتاسيوم لا تقوم فقط بالنقل النشط لأيونات الصوديوم والبوتاسيوم ولكنها تقوم بطريق غير مباشر بإمداد الطاقة اللازمة للنقل النشط لمواد أخرى كذلك.

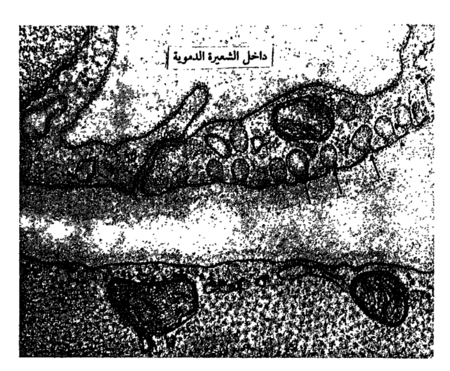
٦-٦. دخول المواد إلى الخلية ENDOCYTOSIS

آلية أخرى تنقل الخلية بها المواد من السائل المحيط بها إلى داخلها هي أن تحيط بها عن طريق إنثناء جزء من غشـاء الخلية للداخـل والجيب النـاتج ينفصل عن الجزء الخـارجي من الغشـاء ليكـون فجوة في السيتوبلازم. في بعض الخلايا تتم الاحاطة بدقائق صلبة مثل البكتريا بهذه الطريقة. تستمد الأميبا غذاءها بابتلاع كائنات دقيقة أصغر منها بنفس الطريقة (الشكل ٦ - ١٠). تؤدي خلايا الدم البيضاء دورا بالغ الأهمية بإبتلاعها للدقائق مثل البكتريا التي قد تدخل إلى جسم الحيوان. هذه العملية التي لوحظت منذ فترة متأخـرة من القرن الماضي تسمى أكل الخلايا phagocytosis. ومع ذلك فقد تبين في السنوات الأخيرة أن أنواعا كثيرة من الخلايا تستطيع أن تبتلع قطرات من السائل المحيط بها بتكوين فجوات مع أن هذه الفجوات أصغر من أن تتسع لدقائق صلبة. ومهما كان حجم ومحتويات الفجوة فان آلية الابتلاع (التي تتطلب خيوط دقيقة فعالة) تكون دائما واحـدة. ولذلك فإن المصطلح الشامل دخـول المـواد إلى الخليـة endocytosis قد بدأ ينتشر إستعماله لوصف هذه العملية.

الأبتلاع يسمح للجزيئات الكبيرة مثل البروتينات (وهي أكبر حجما ومحبة للماء أكثر من أن يسمح بمرورها عن طريق الانتشار البسيط) بالدخول إلى الخلية. (الشكل (٦-١١) هو صورة بالمجهـر الاليكتروني لقطاع في جدار إحدى الشعيرات الدموية



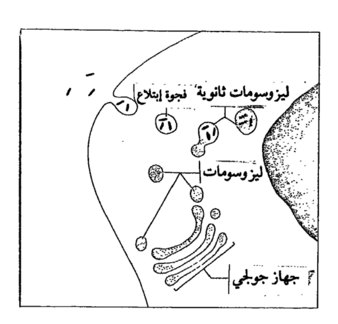
الشكل ٦-١٠. الابتلاع في الأميبا. حتى عندما تتم الاحاطة بالضحية فانها تظل معزولة عن سيتوبلازم الأميبا بغشاء حول الفجوة الغذائية. إبتلاع الدقائق الصلبة يسمى كذلك أكل الخلايا.



الشكل ٦-١١ . الابتلاع في خلية رقيقة تشكل جدار شعيرة دموية . لاحظ أن الانثناءات للداخل قد تكونت على سطحي الخلية . (٥٦٠٠٠ مرة - عن فاوست : الخلية عضياتها ومحتوياتها - شركة و. ب. سوندرز - ١٩٦٦) .

(أصغـر نوع من الأوعية الدموية في أجسامنا) . عند القمة يوجد الجزء الداخلي أو تجويف الشعيرة.في الوسط يوجد الفراغ النسيجي الفاصل بين جدار الشعيرة والخلية العضلية القريبة (في الجزء السفلي) وترى بوضوح الثنيات الداخلية الصغيرة في غشاء الخلية وأغلبها ممتلىء بالسائل المحيط بالخلية من الفراغ النسيجي ولكن يمكن رؤية بعضها على الجانب الآخر من الجدار كذلك . وهي تبدو ممتلئة بسائل من داخل الشعيرة الدموية .

مجرد حدوث إنثناء داخلي في جزء من غشاء الخلية بما يحوية من مواد من السائل المحيط بالخلية لايؤدي إلـى وصـول هـذه المـواد إلـى البلازما السائلـة للخليـة فهـي تبقـي محفوظـة داخـل فجـوات محاطـة بالأغشيـة . ولكن سـرعان مايلتحـم واحـد أو أكثـر مـن الليسوسـومـات (أنظـر القسـم ٥-١٠) مـع فجـوة الابتلاع endocytic vacuole وتختـلط محتـويات العضيـات. التـركيب النــاتج يسمـى الليســوســوم الثانـوي secondary lysosome (الشكل ٦-١٢) . وقد تذكر أن الليسوسومات تكون



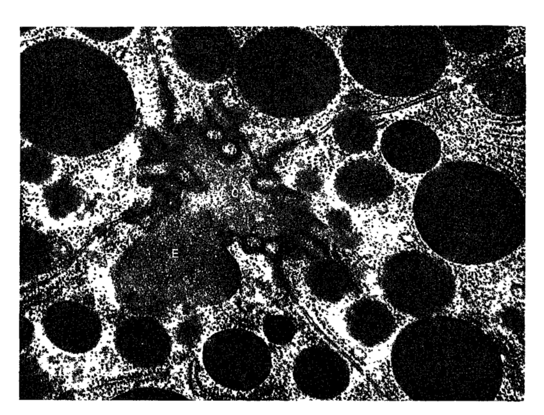
الشكـل ٦-١٢. الفجوات النـاشئة عن عملية الابتلاع تلتحم مع الليسـوسـومـات. التـراكيـب النـاتجـة هي اللسيـوسـومـات الثـانوية. الليسوسومات الثانوية نفسها يمكن أن تلتحم مع فجوات ابتلاعية اضافية. يتم تصنيع الليسوسومات بواسطة جهاز جولجي.

ممتلئة بانزيمات قادرة على تحليل كل أنواع الجزيئات الكبيرة. النواتج الذائبة لعمليات التميؤ الانزيمية (مثل الأحماض الأمينية والسكريات والنيوكليوتيدات) يمكنها بعد ذلك أن تمر من الليزوسوم الثانوي إلى البلازما السائلة للخلية.

هذا لايستنفذ بأي حال من الأحوال قدرات الانزيمات الموجودة في الليسوسومات. فالليسوسومات الثانوية يمكنها أن تلتحم مع فجوات إبتلاع جديدة وتهضم محتوياتها.

٦-٧. خروج المواد من الخلية EXOCYTOSIS

الطرد هو عكس الابتلاع. في الخلايا المفرزة لكميات كبيرة من البروتين يتجمع البروتين أولا في كيس محاط بالأغشية في جهاز جولجي ويتحرك هذا الكيس إلى سطح الخلية حيث يلتحم غشاؤه مع غشاء الخلية ثم يفرغ محتوياته إلى الخارج (الشكل ٦-١٣). تقوم الخلايا المبطنة لأمعائنا بتخليق قطرات ضئيلة من الدهن ثم تطلقها إلى الخارج بالطرد. وربما كانت بعض الفجوات الضئيلة المبينة في الشكل (٦-١١) ليست في حالة أخذ مواد بالابتلاع وانما في حالة تفريغ مواد بالطرد. بعبارة أخرى فان فجوات الابتلاع التي تتكون عند أحد أسطح الخلية قد تتحرك عبر الخلية إلى السطح الاخر حيث تلفظ محتوياتها وبهذه الطريقة تنتقل المواد بكفاءة عبر جدار الشعيرة الدموية.



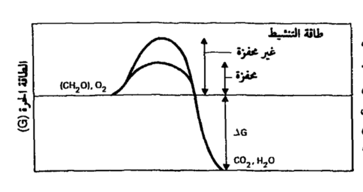
الشكل ٦-١٣ الطرد. الأجسام الكروية الكبيرة تحتوي على إنزيمات هضمية يرى أحدهـا في حالة تفريغ محتوياته (E) في القناة البينخلوية (C) عند التقاء أركان هذه الخلايا الأربعة من بنكرياس الخفاش.
«٣٠٠٠٠ مرة من فاوست: الخلية عضياتها ومحتوياتها ـ شركة و.ب. سوندرز ـ ١٩٦٦».

٦-٨. كيمياء الخلية CELL CHEMISTRY

الخلية هي معمـل كيميائي حقيقي. فقـد تم اكتشـاف المئـات من التفـاعلات الكيميائية التي تحدث في الخلايا وتزداد القائمة كل عام.

حينـما ألقينا نظرة سريعة على التفاعلات الكيميائية في الباب رقم (٣) علمنا أن بعـض التفاعـلات تتمخض عن إنطلاق طاقة حرة (G △ -). بينما يتطلب بعضها أخذ بعض الطاقـة الحـرة (G △ +) مثال للنوع الأول هو إحتراق أي وقـود مثل الخشب والفحم والبترول أو (وهذا ما يهمنا بصفة خاصة) الجلوكوز. معادلة الاحتراق الكامل للجلوكوز هي:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

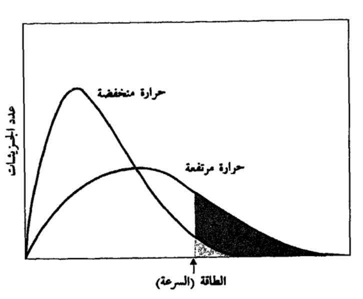


الشكـل ٦-١٤ . علاقـات الطاقة عند حرق أو تنفس أحد الكـربـوهيـدرات (CH_2O) مثـل الجلوكـوز. عامـل حفاز ينقص طاقـة التنشيط الـلازمـة فيجرى التفـاعـل بسرعـة عنـد درجات الحرارة المنخفضة .

في هذه الحالة تكون ΔG ٦٨٦ كيلـو سعر أي أن إحتـراق ١ مـول (١٨٠ جـم) من الجلوكوز يطلق ٦٨٦ كيلو سعـر من الطاقـة . قيمـة ΔG تمثل الفرق بين مجموع طاقة الروابط للمواد الداخلة في التفاعل ومجموع طاقة الروابط للمواد الناتجة منه . في الشكل (٦-١٤) يكون ذلك ممثلا بالخطين الأفقيين وكما يتضح من الرسم البياني فان هذه العملية تكـون عملية تنـازلية downhill. فهي تتطلب طاقة لكسر روابط المواد الداخلة في التفاعل أقل من الطاقة المطلوبة لتكوين الروابط في المواد الناتجة منه . لماذا إذن لاتحدث هذه العملية تلقائياً ؟ لماذا لا يشتعل وعاء به جلوكوز عند تعرضه للأوكسجين ؟

السبب هو أن هذه العملية لايمكن أن تحدث بدون إدخال كمية معينة من الطاقة تسمى طاقـة التنشيـط energy of activation. يمكن النظر إلى هذه العملية من حيث ضرورة الاحتياج إلى طاقة لكسر روابط المواد الداخلة في التفاعل حتى تكون عملية إعادة ترتيب الذرات ممكنة . الحصول في النهاية على طاقة أكبر مما وضعت في التفاعل لايلغي الحاجة إلى طاقة للبدء فيه . يمكن تمثيل ذلك بيانيا برسم حاجز أو تل لابد من التغلب عليه قبل أن يكون التفاعل الكيميائي ممكن الحدوث . طريقة أخرى للنظر إلى هذه المشكلة هي من حيث قوة التصادمات التي لابد أن تحدث إذا كان لجزيئات المواد الداخلة في التفاعل أن تنقل إليكترونات من أحد المدارات إلى آخر . عند درجة حرارة معينـة فان أي مجموعة من الجزيئات يكون من بينها جزيئات عديدة تتحرك بسرعة متوسطة أو أقرب مايكون اليها (ودرجة الحرارة هي مقياس لسرعة الجزيئات) وكذلك أعداد متناقصة من جزيئات تتحرك بسرعات أقل أو أكبر من ذلك (الشكل ٦-١٥) .

دعنا نقول أن الجزيئات التي تتحرك بسرعات أكبر من القيمة المشار إليها بسهم في



الشكــل ٦-١٥. توزيــع الطاقــات في مجمــوعتين من الجزيئات واحدة محفوظة عند درجة حرارة منخفضة والأخرى عند درجة حرارة مرتفعة يشير السهم الى الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لكي تتفاعل هذه الجزيئات كيميائيا. عند درجة الحرارة العالية تتخطى نسبة أكبر من الجزيئات الحد الأدنى من الطاقة ويستمر التفاعل بصورة أسرع.

الشكل (٦-١٥) هي فقط التي لها طاقة كافية للتصادم الفعال فيما بينها بحيث تحدث التغير الكيميائي. تحت ظروف درجات الحرارة المنخفضة (الشكل ٦-١٥) فانك تتوقع أن يحدث التفاعل ببطء شديد. هذا هو الحال مع ملعقة شاي من بللورات الجلوكوز المعرضة للهواء.

كيف يمكننا الاسراع بهذا التفاعل الذي يعطي أكثر مما يأخذ من الطاقة ($\Delta G -$)؟ طريقة سهلة هي رفع درجة الحرارة وبذلك تكتسب نسبة أكبر من الجزيئات الطاقة اللازمة (الشكل ٦-١٥) ويكون هناك تصادمات عنيفة أكثر فأكثر وتزيد سرعة التفاعل. إذا وجهنا لهب بنزن إلى الجلوكوز فسوف يشعله بسرعة ويأخذ الجلوكوز في الاحتراق بسهولة بدون مزيد من اللهب من موقد بنزن. الطاقة المنبعثة من الجزيئات المحترقة سوف تمد بقية الجزيئات بطاقة التنشيط ويستمر الاحتراق تلقائياً حتى تكتمل العملية.

بالطبع لاتتناسب حرارة اللهب مع الحياة. كيف تقوم الخلايا الحية إذن بتفاعلاتها الكيميائية بسرعات عالية بالقدر الذي يجعلها مفيدة وعند درجات حرارة منخفضة بالقدر الذي يجعلها مأمونة؟ الاجابة هي باستخدام الانزيمات.

٦-٩. الإنزيمات (أو الخمائر) ENZYMES

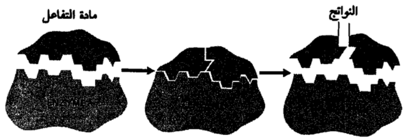
الانزيمات هي مواد حفازة. وهي مواد (بروتينات) تتحد مؤقتا مع مادة أو أكثر من

المواد المتفاعلة وبذلك تخفض من حاجز الطاقة - طاقة التنشيط اللازمة - للتفاعل (الشكل ٦-١٤) وبذلك تسمح بحدوثه بسرعة. في الباب (٧) سوف ندرس سلسلة كاملة من التفاعلات التي تحفزها الانزيمات وفيها تنطلق طاقة أكسدة الجلوكوز ΔG - بسرعـة وبأمان (أي عند درجات حرارة معتدلة) داخل الخلية.

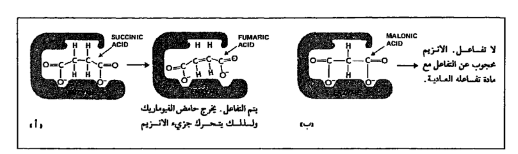
لكي يقوم الانزيم بعمله لابد له أن يتحد (ولو لفترة وجيزة للغاية) بأحد المتفاعلات على الأقل. في معظم الحالات لاتكون القوي التي تربط الأنزيم بالمادة المتفاعلة روابط تساهمية ولكن بدلاً من ذلك تقوم الروابط الهيدروجينية أو الروابط الأيونية أو التجاذب المتبـادل بين الأجزاء الكارهة للماء من الجزيئين إما منفردة أو مع بعضها بربط المادة المتفاعلة مع الأنزيم لفترة وجيزة. معظم هذه الارتباطات تكون ضعيفة وخاصة عندما يكون الارتباط بين ذرات متباعدة (أي حوالي ١ أنجستروم). يترتب على ذلك أن ارتباط الانزيم مع المادة المتفاعلة لابد أن يتطلب الاقتراب الشديد للجزيئين وبمساحة كبيرة تكفي لوجود عدد من هذه القوى الضعيفة للتجاذب. لابد لجزيء المادة المتفاعلة أن يستقـر في سطح مكمل من أسطح جزيء الانزيم بطريقة تشبه إلى حد ما إستقرار المفتاح في القفل (الشكل ٦-١٦).

ضـرورة وجود تكامل complementarity في أشكال الانزيم والمادة المتفاعلة قد تفسر التخصص specificity الدقيق لمعظم الانزيمات. بصفة عامة يستطيع إنزيم معين أن يحفز تفاعل كيميائي واحد أو في أحسن الأحوال تفاعلات قليلة يكون للمتفاعلات بها نفس التركيب العام.

ضرورة حدوث اتحاد بين الانزيم والمادة المتفاعلة تفسر أيضا ظاهرة الإعاقة التنافسية



الشكل ٦-١٦. **إتحاد إنزيم مع مادة تفاعله يعمل على إعادة ترتيب رابطة تساهمية أو أكثر من مادة التفاعل بتخفيض طاقة التنشيط اللازمة لكسر هذه الروابط.**



الشكـل ٦-١٧ . (أ) رسم تخطيطي لفعـل إنـزيم سكسينيـك دى هيـدروجينيز على حامض السكسينيك . (ب) الاعاقة التنافسية للانزيم بواسطة حامض المالونيك .

competitive inhibition. أحـد الانـزيمات الـلازمة لإطلاق الطاقة داخل الخلايا هو السكسينيك دى هيدروجينيز succinic dehydrogenase. هـذا الانزيـم يحفـز أكسدة حامض السكسينيك بانتزاع ذرتي هيدروجين منه (الشكل ٦-١٧) . الناتج من هذا التفاعل هو حامض الفيوماريك . إذا أضيف حامض المالونيك إلى الخلايا أو حتى إلى أنبوبة إختبار بها خليط من حامض السكسينيك والانزيم فان التأثير العادي للانزيم يعـاق بدرجـة كبـيرة . ماذا حدث؟ تركيب حامض المـالـونيك يشبة تركيب حامض السكسينيك وهـو يلتحم مع نفس المـوقع على الانزيم ولا يمكن أن تحدث أكسدة وبالتالي لايكون هناك إنطلاق سريع للنواتج . وعليه فكلما إرتبط جزىء من حامض المالونيك مع جزىء إنزيم فانه يمنع جزىء الانزيم من الارتباط مع المادة المتفاعلة العادية وهي حامض السكسينيك . وتسمى هذه تنافسية لأنك إذا زدت تركيز حامض السكسينيك بالنسبة لتركيز حامض المالونيك فانك تعيد سرعة الحفز إلى معدلها المعتاد تدريجيا . وفي الـواقع فانه عند نسبة ٥٠ : ١ من جزيئات حامض السكسينيك إلى جزيئـات حامض المالونيك فان المادتين تتنافسان بنفس الدرجة على موضع الارتباط الموجود بالانزيم .

دليل مباشر على اتحاد مادة التفاعل مع الانزيم هو عزل مثل هذا المركب المعقد . ولكن ذلك صعب للغاية بسبب الضعف الشديد للارتبـاط بينهـما . عـلى سبيل المثال انزيم الكاتاليز catalase يحفز تحلل فوق أكسيد الهيدروجين الى ماء وأوكسجين :

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$$

وهـو يتحـد مـع H_2O_2 ويحفز التحلل وتنطلق النواتج بسرعة حتى أن جزيئا واحدا

يستـطيع تكسـير ٥,٦ مليون جزيء من فوق أكسيد الهيدوجين في الدقيقة. انزيم كربونيك أنهيدريز (وهو موجود في خلايا الدم الحمراء) يعمل بسرعة أكبر. فهو يحفز التفاعل:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

ويستطيع معالجة ٣٦ مليون جزيء في الدقيقة.

السرعة العالية التي تعمل بها الانزيمات هي ميزة مؤكدة للخلايا لأنها تمكن الخلية من العمل بكميات ضئيلة من كل إنزيم. وقد تكون الخلية الواحدة قادرة على أداء مايقرب من ١٠٠٠ تفاعل كيميائي مختلف معظمها يتطلب الانزيم الخاص به. وان القدرة على إعادة استعمال الانزيمات بسرعة هي التي تمكن الخلية من إستيعاب كل هذه الآليات المتباينة في هذا الحجم الصغير.

التفاعل بين الانزيم ومادة التفاعل : مثال

ENZYME SUBSTRATE INTERACTION : AN EXAMPLE

على الرغم من السرعة التي تعمل بها الانزيمات فقد أمكن عزل مركبات معقدة من إنزيم ومادة تفاعل. في مثل هذه الحالات كانت الروابط التساهمية تربط بينهما وباللجوء إلى حيل مناسبة أمكن منع تكسير هذه الروابط وهو عادة جزء من عملية الحفز.

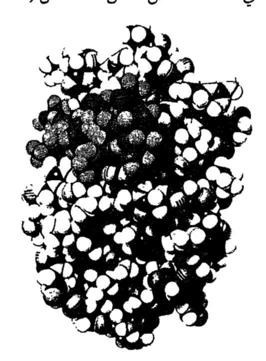
ومن أجل توضيح التكامل الذي نعتقد أنه يوجد بين الأنزيم ومادة التفاعل لابد أن نعرف شكل كل منهما بكل دقة. الانزيمات – من حيث أنها بروتينات – هي جزيئات كبيرة جدا وتحديد تركيبها الثلاثـي (ثلاثي الأبعـاد) عملية شاقـة للغايـة ومع ذلـك فان الـتركيب الثـلاثي لعـدد من الانـزيمات بات معـروفا. أحد هذه الانزيمات هو الليسوزيم lysozyme.

قد تتذكر أن الليسوزيم هو إنزيم موجود في بياض البيض وبعض إفرازات الجسم مثل الدموع وله تأثير قوي مضاد للبكتيريا لأن مادة التفاعل الخاصة به هي مادة عديدة التسكر موجودة في الجدار الخلوي للبكتريا. هذه المادة البكتيرية عديدة التسكر تتكون من سلاسل طويلة من سكرات سداسية وهذه الوحدات السكرية تشبة الجلوكوز إلا

الشكل ٦-١٨ . تركيب عديد التسكر المتشطر بالليسوزيم . الوحدات المتبادلة هي السكر الأميني NAG (ن ـ أسيتـايل جلوكـوز أمين)و NAM (حامض ن - أسيتايل ميوراميك) . الأسهم القصيرة تشير إلى نقاط الاتصال بالسلاسل المتجاورة من عديد التسكر . السهم الكبير يشير إلى الرابطة التي تنكسر بواسطة الليسوزيم .

من حيث وجـود سلاسـل جانبية تحتـوي إحـداهـا على النـتروجين.ارتباط مايسمى بالسكرات الأمينية يشبه الارتباط الذي يحدث في السيليلوز (الشكل ٦-١٨) .

إذا نظرت إلى نمـوذج الليسوزيم في الباب ٤ (الشكل ٤-٢٥) فسوف تلاحظ أن الجزيء يكاد يكون كرويا فيما عدا الانخفاض العميق المبين في الجانب الأعلى الأيسر . في هذا الانخفاض تسكن مادة تفاعل (الشكل ٦-١٩) . يمتلىء هذا الانخفاض بستة



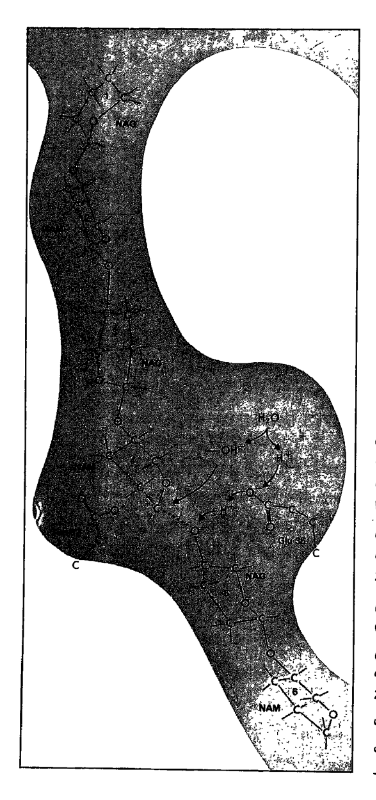
الشكل ٦-١٩ . نموذج ممتلىء الفـراغ لليسوزيم المرتبط بمادة تفاعلة سداسية التسكر (ملونة) . (النموذج من بناء دكتور جون أ . ريبلي، بتصريح من إيرفنج جايس) .

إرتباطات من سلسلة عديدة التسكر أي بست وحدات سكرات أمينية . ومع كثرة ذرات الأكسجين في السكرات فهناك فرص عديدة للروابط الهيدروجينية . يحتمل أن تنشأ ١٤ رابـطة هيدروجينية بين الـوحـدات الست من السكـرات الأمينية وبعض السلاسل الجانبية من الأحماض الأمينية مثل الأرجنين (رقم ١٤) والأسباراجين (رقم ٣٧ ورقـم ٤٤) والـتريبتـوفـان (رقـم ٦٢ ورقـم ٦٣) وحـامـض الأسبـارتيـك (رقـم ١٠١) وكـذلك مع مجموعـات C = O الموجودة في العديد من الروابط الببتيدية . بالاضافة إلى ذلك فقد تساعد التجاذبات الكارهة للمـاء على حفظ مادة التفاعل في مكانها .

وقـد كشف التحليل البللوري بالأشعـة السينية عن ميزتـين هامتين للترابط بين الليسوزيم ومادة تفاعله . فعندما يتحدان يتغير شكل كل منهما قليلا . وحدة السكر السـداسي الرابعة (الحلقة رقم ٤ - أنظر الشكل ٦-٢٠) تلتوي فيتغير شكلها عن المألوف ومن المعتقد أن ذلـك يتسبب في وقـوع ضغط على الرابطة C-O الموجودة في الحلقـة رقم (٤) من ناحية ذرة الأكسجـين الموجودة بين الحلقتين (٤) و (٥) . هذا إكتشاف مثير لأن هذا بالتحديد هو المكان الذي يتميأ عنده عديد التسكر حيث يدخل جزيء ماء بين هاتين الوحدتين من السكر السداسي وتنقطع السلسلة . هنا إذن مثال واقعي لما نعنيه بقولنا أن الانزيمات تخفض من طاقة التنشيط . فالطاقة المطلوبة لكسر هذه الرابطة قد إنخفضت بالتأكيد عندما إنحرفت الذرات المتصلة بهذه الرابطة عن مواضعها العادية .

أما فيما يخص جزيء الليزوزيم نفسه فان ترابط مادة التفاعل معه تتسبب في حركة ضئيلة (حوالي ٠,٧٥ وحدة أنجستروم) لبعض وحدات الأحماض الأمينية مما يجعل الانخفاض يطبق قليلا على مادة التفاعل وعلى ذلك نجد أن القفل تماما مثل المفتاح يغير من شكلة قليلا عندما يقترب كل منهما من الآخر . ويعتقد بعض علماء الكيمياء الحيوية أنه كلما إرتبطت مادة تفاعل مع إنزيمها فانها تدخل بعض التغير الشكلي في تركيب الانزيم .

فحص وحدات الأحماض الأمينية بالقرب من الحلقتين (٤) و (٥) يعطينا تفسير مقبول لاكتمال النشاط الانزيمي . الوحدة رقم (٣٥) (حامض الجلوتاميك Glu) تبعد عـن الجسر ـ ٥ ـ المـطلـوب كسـره بحـوالي ٣ وحـدات أنجسـتروم ومجمـوعـة



الشكــل ٦-٢٠. الآليـة المحتملة للنشـاط الحفـاز لليسوزيم. الارتباط بمـادة التفـاعـل يسبب توتـر بين الحـلقـات (٤)، (٥). الـوحـدة رقـم (٣٥) من جزيء الانـزيم (حـامض الجلوتـاميك) تعطي بروتون لذرة الأكسجين بين الحلقات وذلـك يكسر الـرابـطة بينها وبـين ذرة الكـربـون في الحلقـة (٤). ذرة الكربون وقد أصبحت موجبة الشحنة تستقـر (بـالتجـاذب مع حامض الأسبـارتيـك ٥٢) لفـترة تكفي لاتصـالها مع مجموعة الهيدروكسيل وبهذه الـطريقـة تنكسر السلسلة بادخـال جزيء ماء كمثـال للتميوء. تتحرر النواتج من الانزيم ويمكن تكرار العملية.

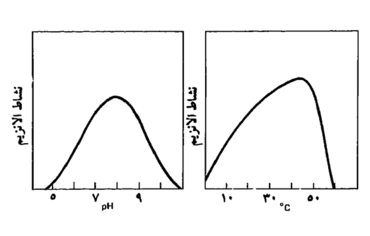
الكربوكسيل الحرة في حامض الجلوتاميك تعطي بروتونات ويمكنها أن تنقل بروتونها إلى ذرة الأكسجين وهذا يمكن أن يؤدي إلى كسر الرابطة الواقعة فعلا تحت ضغط بين ذرة الأوكسجين وذرة الكربون بالحلقة رقم (٤) (الشكل ٦-٢٠). الآن وقد فقدت ذرة الكربون إليكترون فانها تكتسب شحنة موجبة والكربون المتأين عادة يكون غير مستقر للغاية ولكن تجاذب أيون الكربوكسيل سالب الشحنة من الوحدة رقم (٥٢) (حامض الأسبــارتيك) يمكن أن يجعله مستقـراً لفـترة تكفي لاتحـاده مع أيون OH^- (من جزيء ماء متحلل تلقائيا) - تذكر أنه حتى عند الأس الهيدروجيني (٧) فان الماء يتحلل تلقائيا ليعطـي 10^{-7} مول من أيونات H^+ وOH^-. البروتون المتبقي (H^+) يمكن أن يحل محل البروتون الذي فقدته الوحدة رقم (٣٥) Glu.

الآن إكتمل التفاعل : إنكسرت السلسلة وانفصلت القطعتان عن الانزيم والانزيم أصبح حراً ليلتصق بوضع جديد على الجدار الخلوي للبكتريا ويعاود نشاطه. وبهذه الطريقة يتحلل الجدار الخلوي للبكتريا.

متطلبات النشاط الفعال للانزيم

REQUIREMENTS FOR EFFECTIVE ENZYME FUNCTIONING

يتأثر نشاط الانزيم كثيرا بالتغير في درجة الحرارة وفي الأس الهيدروجيني وكل إنزيم يعمل بكل كفاءة عند درجة حرارة معينة وأس هيدروجيني معين وتتناقص هذه الكفاءة عند قيم أعلى أو أقل من هذه النقطة (الشكل ٦-٢١). إنزيم الببسين pepsin الذي يهضم البروتينات يعمل بكل كفاءة عند أس هيدروجيني من (١) إلى (٢) بينما يكون إنزيم بروتيوليتي (هاضم للبروتين) آخر وهـو التربسيـن trypsin غير فعال بالمرة عند هذا الأس الهيدروجيني ويعمـل بكفـاءة عند أس هيدروجيني (٨). والآن وقد فهمنا: (١) الدور الأساسي الذي يلعبه التركيب الثلاثي، أي الشكل في نشاط الانزيم (٢) الدور الأساسي الذي تلعبه تلك القوى الضعيفة مثل الروابط الهيدروجينية والروابط الأيونية في تحديد التركيب الثلاثي فانة يمكننا أن نفهم لماذا تكون الانزيمات حساسة لدرجة الحـرارة ولـلأس الهيدروجيني. فالـروابط الهيدروجينية تنكسر بسهولة بارتفاع درجة الحرارة وهذا بدوره قد يؤدي إلى تغير في أجزاء من التركيب الثلاثي للأنزيم التي تكون أساسية للارتباط مع مادة التفاعل. كذلك فان التغيرات في الأس الهيدروجيني تغير من



الشكـــل ٦-٢١ . تأثـير الأس الهيـدروجيني ودرجـة الحــرارة على نشـاط إنـزيم وهمي. الجـزء الصـاعد من منحني درجة الحرارة يعكس التأثير العام لدرجات الحرارة المــتـزايــدة على معــدل التفاعلات الكيميائية (أنظر الشكـــل ٦-١٥). الجــزء الهــابط من المنحني يعكس الفقد في النشاط الحفاز حيث تتخثر جزيئات الإنزيم عند درجات الحرارة العالية.

حالة التأين للأحماض الأمينية ذات الشحنات (مثل حامض الأسبارتيك واللايسين) والتي قد تلعب دوراً حاسماً في الارتباط مع مادة التفاعل أو في عملية الحفز ذاتها أو في كليهــا معاً. فبدون مجموعة الكربوكسيل COOH- غير المتأينة من Glu - 35 ومجموعة الكربوكسيل المتأينة - COO - من Asp-52 فان النشاط الحفزي لانزيم الليزوزيم يتوقف.

هناك إنزيمات عديدة لاتعمل إلا في وجود مادة إضافية غير بروتينية تسمى العامل المساعد cofactor . والعوامل المساعدة قد تكون أيون معدنـي مثـل Zn^{++}(وهو المرافق الانزيمي للكربونيك أنهيدريز). Cu^{++}, Mn^{++}, Mg^{++}, K^{+}, Fe^{++}, or Na^{+}.
وقد يكون المرافق الانزيمي جزيء عضوي صغير ويسمى المرافق الانزيمي coenzyme. على سبيل المثـال مجمـوعـة فيتـامينـات ب (مثـل الثيامين ب ـ ١ والريبوفلافين ب ـ ٢ والنيكوتينامايد) تعمل كمرافقات إنزيمية وقد ترتبط المرافقات الانزيمية بقوة (أى تساهمياً) بالجزء البروتيني من الانزيم كمجموعة فعالة Prosthetic group. والبعض الآخر قد يكون إرتباطه بالانزيم ضعيفا بل قـد يرتبط بالانزيم فقط فـي لحظـة قيامه بالنشاط الحفزي.

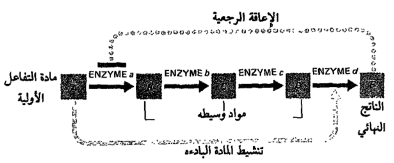
٦-١٠ . تنظيم عمل الانزيمات REGULATION OF ENZYMES

بالنظر إلى العدد الكبير من الانزيمات الموجودة في الخلية فان التساؤل يثور حول كيفية تنظيم نشاط هذه الانزيمات. هناك عدة آليات تلعب دوراً في كفاءة وتنسيق عمل الانزيمات داخل الخلية.

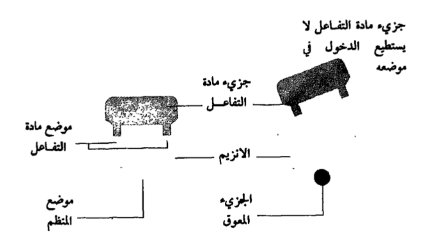
بالنسبة لتلك الانزيمات مثل البروتينيزات التي تستطيع مهاجمة مادة الخلية نفسها فانه يتم تثبيط نشاطها أثناء وجودها داخل الخلية. فمثلا الانزيم البروتينيزي بيبسين يتم تصنيعه داخل الخلية في صورة غير فعالة تسمى البيبسينوجين pepsinogen ولا ينفصل الجزء من جزيء الانـزيم المثبط لنشاطه إلا عندما يتعرض لظروف الأس الهيدروجيني المنخفض خارج الخلية وبذلك ينتج البيبسين النشط. الانزيمات الأخرى التي قد يكون لها نشاط هدام يتم حصرها في الليزوزومات (القسم ٥-١٠) وبذلك تنعزل عن بقية الخلية.

العديد من إنزيمات الخلية لاتستطيع التحرك بحرية داخل الخلية ولكن بدلا من ذلك يتم ترتيبها في أنماط محددة. فالانزيمات الموجودة داخل الميتوكوندريا وفي البلاستيدات الخضر تبدو منظمة فراغيا بالطريقة التي تجعلها تتفاعل بأعلى كفاءة. ومن المحتمل أن تكون جزيئات الانزيمات المنظمة فراغيا موجودة كذلك على غشاء الخلية وعلى أغشية الشبكة الاندوبلازمية.

نشاط الانزيمات داخل الخلية يكون محكوماً أيضا بالحاجة إليها. فاذا بدأ أحد نواتج سلسلة من التفاعلات الانزيمية (حامض أميني مثلا) في التراكم داخل الخلية فانه يعيق بالتحديد عمل أول إنزيم مشترك في تخليقه (الشكل ٦-٢٢). وهكذا يتوقف مؤقتا إنتاج المزيد من هذا الحامض الأميني. هذه الظاهرة تسمى الاعاقة الرجعية feedback inhibition ومن ناحية أخرى فان تراكم مادة داخل الخلية قد يحدث تنشيط بالتحديد للانزيم الذي يبدأ تتابع من التفاعلات تكون هذه المادة هي مادة التفاعل الابتدائية



الشكل ٦-٢٢ . آليتان إتزانيتان لتنظيم تركيزات المواد الأيضية في الخلية. تراكم مادة التفاعل (A) ينشط الإنزيم (d) فيجر المادة (A) إلى الدورة الأيضية. تراكم الناتج (E) يوقف نشاط الإنزيم (a) فيعيق تخليق المزيد من المادة (E) .



الشكل ٦-٢٣ . الآلية المحتملة للإعاقة الرجعية . في حالة تنشيط المادة البادءة يسمـح الجزيء المنظم لمادة التفاعل بالارتباط مع موضعها . في كلتا الحالتين فان الجـزيء المنـظم يغـير من قابليـة الانزيم لمادة تفاعلة ربها من خلال تغيير شكل الإنزيم . مثل هذا التأثير يسمى بالتأثير الفراغي المغاير .

لها (الشكل ٦-٢٢) . هذا النشاط (الذي يسمى بتنشيط المادة البادئة precursor ac-tivation) يختزل تركيز مادة التفاعل الابتدائية إلى المستويات العادية .

لاحظ أنه في كلتا هاتين الحالتين كان النشاط الانزيمي محكوماً بهادة ليست هي مادة تفاعلة . وقد نتوقع أن الجزيء المنظم لنشاط الانزيم عليه أن يرتبط بالانزيم حتى يؤثر على أدائة لوظيفتة وهذا مايحدث بالفعل . ومن المثير للاهتهام أن موضع إرتباط الجزيء المنظم ليس هونفس الموضع الذي ترتبط به مادة التفاعل . ومع ذلك فانه عندما يرتبط الجزيء المنظم بموضعه فانه يغير من شكل الانزيم بطريقة تجعل نشاطـه يتغيـر . هذا التفاعل بين المواضع المنظمة والمواضع الحفازة الذي ينشأ عن التغير في شكل الانزيم يسمى بالتـأثير الفـراغي المغايـر allosteric effect. في حالة الاعاقة الرجعية يظهر التأثير الفراغي للجزيء المنظم بحيث تنخفض قابلية الانزيم لمادة التفاعل . وفي حالة تنشيط المادة البادئة يحدث العكس . التأثير الفراغي المغاير للجزيء المنظم يزيد من قابلية الانزيم الأخير في السلسلة لمادة تفاعلة (الشكل ٦-٢٣) .

الآليات سابقة الذكر تضمن أن نشاط الانزيهات الموجودة في الخلية يكون منظما . ماذا عن الانزيهات التي لايكون هناك أي حاجة إليها بالمرة أو تلك التي يكون هناك حاجة إليها ولكنها غير موجودة ؟ هنا كذلك توجد ضوابط دقيقة . هذه تنظم معدل

تخليق إنزيمات جديدة. فمثلا إذا حدث إمداد للخلية بكميات زائدة من حامض أميني من السائل المحيط بها فان تخليق جميع الانزيمات التي تستعملها الخلية عادة في إنتاج هذا الحـامض الأميني لنفسهـا يتـوقف. وبذلك ترفع الخلية من كفاءتها بعدم إنتاج الانزيمات التي لاتحتاج إليها. وبالعكس إذا توفرت للخلية مادة تفاعل جديدة فانها تحث تخليق الانزيمات اللازمة للتعامل معها. خلايا الخميرة عادة لاتقوم بتخمر السكر الثنائي لاكتوز وعادة لايمكن الكشف عن وجود إنزيم اللاكتيز في خلاياها. ومع ذلك إذا نمت خلايا الخميرة على محلول يحتوي على اللاكتوز فانها تبدأ في إنتاج اللاكتيز ويتم فيها أيض هذا السكر.

في تلك الحالات التي يكون فيها تخليق الانزيمات منظما فانه من الواضح أن هذا التنظيم يعمل من خلال الضوابط الوراثية الموجودة في شفرة الحامض DNA بالنواة. سوف نتعرض في أبواب لاحقة للآليات التي يبدأ ويتوقف بها فعل أجزاء من الشفرة الوراثية إستجابة لاحتياجات الخلية.

من الواضح أن هذه الضوابط تعمل معاً على إستقرار مستويات مواد التفاعل ونواتج التفاعل في الخلية وفي تناسق مع الاحتياجات المتغيرة للخلية سواء كانت هذه الضوابط تؤثر على الانزيمات الموجودة فعلا في الخلية أو على معدل تخليق إنزيمات جديدة.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

كل خلية تعتمد في وجودها على خواص السائل المحيط بها. وتدخل المواد إلى الخلية وتخرج منها بعده آليات مختلفة.

١ ـــ **الانتشـار** Diffusion. يحدث عندما تنتقل الجزيئات أو الأيونات في اتجاه فرق تركيزها. بعض الخلايا تستطيع زيادة نفاذية أغشيتها لجزيئات أو أيونات معينة فيحدث الانتشار الميسر.

٢ ـــ **الأوزموزية** Osmosis. الأوزموزية هي إنتشار الماء. فالماء النقي ناقص التوتر بالنسبة لسيتوبلازم جميع الخلايا ولابد للخلايا وللكائنات المعرضة للماء العذب من بعض التكيف لمنـع إنفجـارهـا نتيجة للأوزموزية. ماء البحر زائد التوتر بالنسبة لسيتوبلازم العديد من الخلايا ولابد للكائنات البحرية من التكيف لمنع فقدها للماء.

٣ ــ **النقل النشـط** Active transport . بعض الجزيئات تستطيع التحرك عبر أغشية الخلية ضد اتجاه فرق تركيزها اذا توفر لها انزيم النقل المناسب ومصدر الطاقة.

٤ ــ **الابتـلاع داخـل السيتوبـلازم** Endocytosis . العديد من الخلايا تبتلع المواد الموجودة فـي السائل المحيط بها بتكوين جيوب في غشاء الخلية ثم فصمها عن الغشاء.

٥ ــ الـطرد خـارج السيتـوبـلازم Exocytosis . بعض الخلايا تتخلص من المواد الموجودة في مثانات تحدها أغشية عن طريق التحام هذه المثانات مع غشاء الخلية.

تحدث عدة مئـات من التفاعلات في الخلايا. في معظم الحالات لا تكون كمية الطاقة الحرة المختزنة في النواتج مساوية لتلك الموجودة في المواد الداخلة في التفاعل. والفرق بينها يأخذ الرمز ΔG . التفاعلات التي تطلق طاقة حرة ($- \Delta G$) يمكن أن تستمـر تلقائيا. التفاعلات ذات ΔG + تتطلب إمدادها بالطاقة. النباتات الخضر تستخدم طاقة الشمس للقيـام بالتفاعلات ذات ΔG + جميع الكائنات تستطيع القيام بالتفاعلات ذات ΔG + عن طريق ربطها بتفاعل تنطلق منـه طاقة ($- \Delta G$).

كل تفاعل كيميائي داخل الخلية يحفزه إنزيم. ليس للإنزيمات أي تأثير على ΔG لأي تفاعيل كيميائي ولكنها تجعل التفاعل يحدث بصورة أوسع عن طريق خفض طاقة التنشيط اللازمة للمواد المتفاعلة.

الإنزيمات تخفض طاقة التنشيط للتفاعل من خلال إرتباطها (عادة لا تساهمياً) مع واحدة على الأقل من المواد المتفاعلة (تسمى مواد التفاعل).

جميع الانـزيمات بروتينـات. والعـديد من الإنـزيمات يتطلب وجود جزيئات غير بروتينية (مرافقات إنزيمية) أو أيونات كي تؤدى علمها. بعض المرافقات الإنزيمية ترتبط تسـاهميا مع الإنـزيم كمجموعة فعالة. نشاط الإنزيم على مادة تفاعله يكون محكوماً عليه بجزيئات أخرى ترتبط بموضع مختلف (فراغي مغاير) على جزىء الإنزيم.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ صف ثلاث طرق لدخول المواد إلى الخلايا المبطنة لأمعاء الانسان.

٢ ــ بعد أن يبلغ المولاس أقصى أرتفاع له (أنظر الشكل ٦-٤) ماذا يحدث؟ ولماذا ؟

٣ ــ أيهما يكون له ضغط أوزموزي أعلى : محلول ١ مولار من الجلوكوز أم محلول ١ مولار من الملح ؟ ولماذا ؟

٤ ــ ماذا يمكن أن يحدث عند وضع كل من خلايا الدم الحمراء وخلايا نباتية وأميبا في ماء مقطر ؟ إشرح.

٥ ــ ماذا يمكن أن يحدث عند وضع كل من خلايا الدم الحمراء وخلايا نباتية في ماء البحر ؟ إشرح.

٦ ــ ماذا يمكن أن يحدث عند وضع الأميبا في محلول متعادل الأوزموزية؟

٧ ــ إذا أطلق واحد مول (٢٨ جم) من جزيئات النتروجين (N_2) و واحد مول (٢٨ جم) من جزيئـات الايثيلين (CH_2CH_2) على جانبي حاجـز يقسم غرفة إلى جزئين متساويين ثم رفع الحاجز فهل تعتقد أن إنتشار الجزيئات سوف يحدث ؟ اشرح.

REFERENCES المراجع

1- HOLTER, H., "How Things get into Cells", Scientific American, Offprint No. 69, September, 1961. An excellent review of the forces of passive and active transport across cell membranes.
2- SATIR, BIRGIT, "The Final Steps in Secretion", Scientific American, Offprint No. 1328, October, 1975. On exocytosis.
3- PHILLIPS, D. C., "The Three - Dimensional Structure of an Enzyme Molecule, "Scientific American, Offprint No. 1055, November, 1966. Describes how the shape of the enzyme lysozyme was worked out and how this shape accounts for the antibacterial action of the enzyme.
4- CHANGEUX, J.-P., "The Control of Biochemical Reactions", Scientific American, Offprint No. 1008, April, 1965.
5- HOLLAWAY, M.R., The Mechanism of Enzyme Action, Oxford Biology Readers, No. 45, Oxford University Press, Oxford, 1976.
6- STROUD, R.M., "A Family of Protein - Cutting Proteins", Scientific American, Offprint No. 1031, July, 1974. Describes the mechanism of action of several proteases.
7- KOSHLAND, D.E., JR., "Protein Shape and Biological Control", Scientific American, Offprint No. 1280, October, 1973. The importance of allosteric interactions.



CHAPTER 7 الباب السابع

انطلاق الطاقة في الخلية
ENERGY RELEASE IN THE CELL

الباب السابع

انطلاق الطاقة في الخليــة

جميع الكائنات تتطلب مدداً مستقراً من المواد والطاقة من البيئة حتى تستمر على قيد الحياة. وبالنسبة للكثير منهم يأتي المصدر الرئيسي للمادة والمصدر الوحيد للطاقة من الجزيئات العضوية التي تتغذى عليها. التغذية المعتمدة بالكامل على جزيئات عضوية سابقة التجهيز تسمى تغذية شاذة heterotrophic والكائنات التي تتغذى بهذه الطريقة تعرف بالكائنات شاذة التغذية heterotrophs الكائنات الدقيقة غير المحتوية على الكلوروفيل (مثل بكتريا القولون *E. coli*) والنباتات القليلة غير الخضراء وجميع الحيوانات شاذة التغذية.

عادة ما تتكسر المواد الغذائية الصلبة إلى جزيئات أصغر نسبياً وقابلة للذوبان قبل أن تستطيع الخلايا الاستفادة منها. عملية التكسير تسمى الهضم Digestion وهي ببساطة عبارة عن التميوء الانزيمي لكل من: (١) عديدات التسكر (مثل النشويات) إلى سكريات (٢) البروتينات إلى أحماض أمينية (٣) الدهون إلى أحماض دهنية وجليسرول (٤) الأحماض النووية إلى نيوكليوتيدات. في كل حالة تدخل جزيئات الماء بين الوحدات فتفصلها عن بعضها ومن هنا جاءت التسمية بالتميوء (أو التحليل المائي): hydrolysis.

ينطلق قدر ضئيل جدا من الطاقة بواسطة التميوء. فتميوء السكر الثنائي مالتوز الى جزيئين من الجلوكوز ينتج ٤ كيلو سعر فقط من الطاقة الحرة:

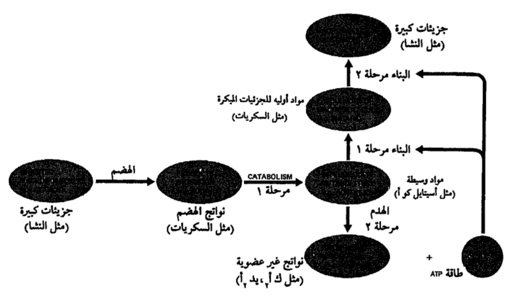
$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2C_6H_{12}O_6$$
$$\Delta G = -4 \text{ Kcal/mole}$$

معظم الطاقة الحرة المختزنة في النشويات والبروتينات والدهون مازالت حبيسة في نواتج هضمها : السكريات والأحماض الأمينية والأحماض الدهنية والجليسرول. ومع ذلك فإن عملية الهضم تختزل حجم الجزيئات بحيث يسهل إمتصاصها من السائل المحيط بالخلية الى سيتوبلازم الخلية.

٧-١ البناء والهدم ANABOLISM AND CATABOLISM

ماهو مصير هذه الجزيئات العضوية الصغيرة بمجرد دخولها الخلية؟ عادة يتم إختزال حجمها لتكوين جزيئات أبسط تحتوي غالبا من ٢ إلى ٤ ذرات كربون. هذه الجزيئات الصغيرة عليها أن تواجه أمرين (الشكل ٧-١). فهي قد تواصل الصعود في مسارات أيضية مختلفة وتعمل كوحدات بناء للسكريات أو الأحماض الدهنية والجليسرول أو الأحماض الأمينية. ومن هذه يمكن تجميع المكونات ذات الجزيئات الكبيرة بالخلية : عديدات التسكر والليبيدات والبروتينات وحتى الأحماض النووية. مرحلة الأيض التي يتم فيها بناء جزيئات كبيرة معقدة من جزيئات أبسط صغيرة تسمى بالبناء anabolism. المصير الآخر للجزيئات ثنائية او رباعية الكربون في الخلية هو الاستمرار في تكسرها حتى تصل في النهاية إلى جزيئات بسيطة غير عضوية مثل NH_3, H_2O, CO_2 (الشكل ٧-١). الكمية الاجمالية للطاقة المختزنة في النواتج النهائية لهذه العمليات التكسيرية أقل بكثير مما كان موجوداً في الجزيئات الأصلية. وعلى ذلك تنطلق الطاقة أثناء هذه الخطوات التكسيرية. هذه المرحلة من الأيض حيث تنكسر جزيئات معقدة نسبيا وغنية بالطاقة إلى جزيئات أبسط وفقيرة في الطاقة تسمى الهدم Catabolism.

تحتوي نواتج التفاعلات البنائية على طاقة اكثر مما في المواد المتفاعلة. بعبارة اخرى فانه لكى يتحول جزىء ثنائي الكربون مثل acetyl - CoA (الشكل ٧-١) إلى حامض دهنى به ١٦ ذرة كربون يتطلب إدخال طاقة تماما كما كان التحليل الكهربي للماء يتطلب طاقة. قيمة ΔG في كل حالة تكون موجبة. وبأسلوب آخر فان هذه التفاعلات لايمكن أن تتم تلقائياً. فسواء كانت هناك عوامل حفازة ام لافان كل التفاعلات الكيميائية تتم تلقائياً فقط في الاتجاه الذي ينتج طاقة حرة اي عندما تكون قيمة ΔG سالبة (إرجع الى الشكل ٦-١٤) كيف يمكن إذن للبناء أن ينجح ؟ السر



الشكـل ٧-١ .   مسارات الأيض. الغذاء المأكول يتحلل الى جزيئات عضوية بها ٢-٤ ذرات كربون . هذه الجزيئات يمكن هدمها للحصول على الطاقة للخلية أو يمكن إستخدامها كوحدات بناء في تخليق الجزيئات الكبيرة في الخلية .

يكمـن في ازدواج تفاعـل هدمـي بمالـه من قيمـة ΔG سالبة مع تفاعل بنائي ذو قيمة موجبة . ولأننا لانامل في تحقيق كفاءة شبه تامة فانة علينا أن نختار تفاعلات هدمية تطلق من الطاقة اكثر مما تحتاجه التفاعلات البنائية .

ربما كان أكثر أنواع الوقود إستعمالا في الخلايا الحية هو الجلوكوز. في الباب (٦) رأينا أن الاحتراق الكامل للجلوكوز ينتج ثاني أكسيد الكربون والماء كنواتج نهائية ويطلق ٦٨٦ كيلو سعر من الطاقة الحرة. ولكن في هذا التفاعل ينطلق معظم هذه الطاقة الحرة في الحال كحرارة. الانتاج المتواضع للحرارة مناسب لتدفئة الخلايا ولكنه عديم الفائدة في دفـع التفـاعلات الكيميائية البنائية . على الخلية أن تجد الوسيلة لتحويل الطاقة الموجودة بالجلوكوز إلى طاقة حرة بجزيئات أخرى تحتاجها مثل حامض أميني وعلى ذلك فان إستراتيجية الخلية هي هدم جزيء الجلوكوز بطريقة لاتفقد خلالها كل الطاقة الحرة المنطلقة في صورة حرارة. والخطة هي أن تتقدم الخلية بخطوات صغيرة ثابتة بحيث تزدوج ΔG - بكفاءة مع الاحتياجات البنائية للخلية (والاحتياجات الاخرى المعتمدة على الـطاقـة). تهدم الخـلايا الحية الجلوكـوز بحيث تنتـج خطوة واحدة على الاقل (ويفضل عدة خطوات) طاقة حرة تكفى لتخليق جـزيء من ATP. القصة الرئيسية في

هذا الباب هي كيف يحدث ذلك.

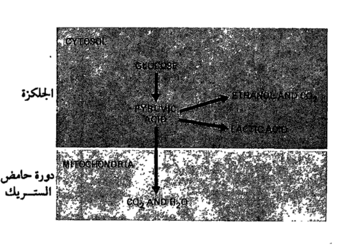
٧-٢ الجلكــزة GLYCOLYSIS

إحـتراق الجلوكـوز يتـطلب أوكسجـين ولكن بعض الخلايا تعيش حيث لايوجد أوكسجـين أو لايكون متاحا طول الوقت. على سبيل المثال خلية الخميرة في زجاجة شمبانيا مغلقة ليس لها سبيل للحصول على الأوكسجين. هناك أسباب قوية تدعو إلى الاعتقاد بأن الخلايا عاشت على هذا الكوكب في جو خال من الأوكسجين. فاذا كان الأمر كذلك فانها أيضا كان عليها أن تواجه مشكلة إستخلاص الطاقة من الوقود بدون وجود الأوكسجين. وعلى أي حال فقد إحتفظت جميع الخلايا الآن بالقدرة الانزيمية على هدم الجلوكـوز بـدون مسـاعـدة الأوكسجين. التكسير اللاهوائي anaerobic (بـدون هواء وبـالتـالي بدون أوكسجـين) للجلوكـوز يسمى الجلكـزة (أو التحليل الجليكوزي) glycolysis. خلية الخميرة في زجاجة الشمبانيا تستغل الجلكزة في الحصول على الـطاقـة التي تحتـاجهـا والنواتج هى الايثانول (الكحول الايثيلي) وثاني أكسيد الكربـون ونحن نسمـى هـذه العمليـة بالتـخمـر الكحـولي alcoholic fermentation. والخلية العضلية المجهدة أيضا تستغل الجلكزة لتغطية إحتياجاتها من الطاقة والناتج النهائي في هـذه العمليـة هو حامض اللاكتيك lactic acid . و نحن نسمى العملية بتخمر حامض اللاكتيك. ولكن معظم الخلايا تستطيع إستخدام الأوكسجين في هدم الجلوكـوز والنواتج النهائية هنا هي ثاني أكسيد الكربون (وحصيلة الطاقة الحرة هي نفسها : ٦٨٦ كيلو سعـر / مول). هذه العملية تسمى التنفس الخلوي cellular re-spiration. ولكن حتى عندما تكون الخلايا قادرة على تنفس الجلوكوز بدلا من تخمره فان الخطوات الاولية مازالت هي نفسها: خطوات الجلكزة (الشكل ٧-٢).

يحدث تكسير الجلوكوز كسلسلة من ١١ تفاعل متتابع تحفزها الانزيمات (١٢ في الخمـيرة). هـذه الانـزيمات توجـد ذائبـة في السائل الخلوي cytosol. بالاضافة إلى الانزيمات هناك مرافقين إنزيميين في غاية الأهمية هما أ. ت. ب. و ن. أ. د

٧-٣. أ. ت. ب. و ن. أ. د. ATP AND NAD

أ. ت. ب. هي إختصار أدينوزين تراي فوسفات (أدينوزين ثلاثى الفوسفات)



الشكل ٧-٢ . الجلكزة هي انتاج حامض البيـروفيـك من الجلوكـوز. الانزيمات اللازمة للجلكزة توجد في السـائـل الخلوي. تحت الـظروف الـلاهـوائيـة قد يتخمـر حامض البيروفيك لتكوين نواتج مثل حامض اللاكتيك (كما في العضلات المجهدة) أو الايثـانـول وثاني أكسيد الكربون (كـما في زجاجة الشمبانيا) . اذا كان الأكسجـين متـوفـر يدخـل حامض البيـروفيـك الى الميتـوكوندريا حيث يتـأكسـد بالكـامل بواسطة أنزيمات دورة حامض الستريك. هذه العملية تسمى التنفس الخلوي.

وهي نيوكليوتيدة سكرها الخماسي هو الرايبوز والقاعدة النتروجينية هي الأدنين (الشكل ٧-٣) . وتتصل ثلاث مجموعات فوسفات بذرة الكربون رقم ٥ من الريبواز . تعرف الروابط بين مجموعة الفوسفات الثانية والثالثة وكذلك بين الأولى والثانية بأنها روابط عالية الطاقة وهي تسمى كذلك بسبب الكمية الكبيرة من الطاقة الحرة التي تنطلق عند كسرها بالتمبوء. تحت الظروف السائدة في الخلايا يصعب تقدير الكمية المنطلقة من الطاقة بدقة وسوف نعتبر أن هذه الكمية هي ٧,٣ كيلو سعر / مول (وان كان من المحتمل أن يكون ذلك تقدير فيه تحفظ) . وبذلك يمكن التعبير عن هذا التميوء كالآتي:

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi;$$

$$\Delta G = -7.3 \text{ Kcal.}$$

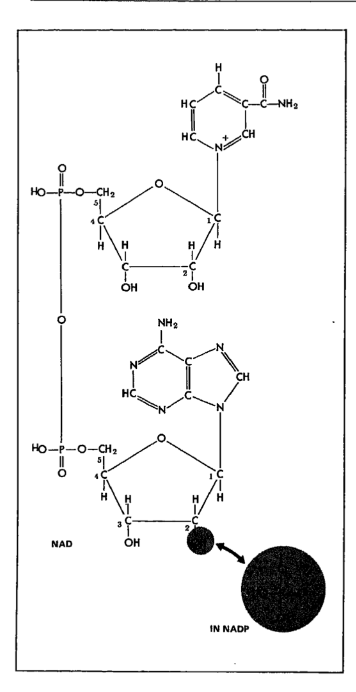
(ADP هوالأدينـوزين ثنـائي الفـوسفـات adenosine diphosphate أمـا Pi فهي الفوسفات اللاعضوية وهي أيضا حامض الفوسفوريك المبين هنا وقد فقد إثنين من بروتوناته الثلاثة) .

$$\mathrm{HO{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{\underset{\underset{\displaystyle O^-}{|}}{P}}{-}O^-.}$$

الشكل ٧-٣ . الصيغة التركيبية لمادة ATP وهي مادة شديد الحموضة. تحت الظروف الموجودة في الخلية (أس هيدروجيني حوالي ٧) تنتزع البروتونات الأربعة الملونة تاركة ٤ ذرات أوكسجين سالبة الشحنة (O−) هذه تجذب الايونات موجبة الشحنة في الخلية مثل Mg^{++} الروابط التي تصل مجموعة الفوسفات الطرفية وقبل الطرفية تعطى كمية كبيرة من الطاقة عندما تتميأ. لهذا السبب غالبا تسمى روابط «عالية الطاقة» وترسم بخطوط متموجة.

من المهم هنا أن نلاحظ أنه عند إستعمال الوصف «عالية الطاقة» بالنسبة لهذه الروابط فاننا لانقصد طاقة الروابط وهو الموضوع الذي ناقشناه بالتفصيل في الباب (٣) ولكن هذا الوصف يعني ببساطة أن نواتج تميوء هذه الروابط المسماة بعالية الطاقة لهم طاقة حرة أقل بكثير مما لمواد التفاعل. إذن في الحقيقة فان هذه الروابط ضعيفة ولها طاقة روابط قليلة. ومع ذلك فان مبدأ الروابط عالية الطاقة في ATP (وفي ADP) قد ترسخ تماما لذلك سوف نحافظ عليه. وفي كل الرسوم التوضيحية سوف نتبع ما إصطلح عليه من رسم هذه الروابط بخطوط متموجة (الشكل ٧-٣).

ن . أ . د . NAD هو nicotinamide adenine dinucleotide وكما هو واضح من الاسم فإنه في الواقع عبارة عن نيوكليوتيدتين مرتبطتين تساهمياً. إحداهما هي الأدينوزين أحادي الفوسفات أي رايبوز مع أدنين مرتبط بذرة الكربون رقم ١- وفوسفات مرتبطة مع ذرة الكربون رقم ٥- (الشكل ٧-٤). الثانية هي ريبونيوكليوتيدة القاعدة النتروجينية بها هي النيكوتيناميد متصلة بذرة الكربون رقم ١- ومجموعة فوسفات متصلة بذرة الكربون ٥-.



الشكل ٧-٤. الصيغ التركيبية لمادتي NAD و NADP . بسبب الشحنة الموجبة في حلقة النيكوتين أميد (أعلى اليمين) فإن الصور المتأكسدة من عوامل الاختزال والأكسدة الهامة هذه غالبا ما تكتب NDA^+ و $NDAP^+$ على التوالي. وعندما يتم إختزالها فإن كل منها تكتسب ٢ إليكترون مع بروتون واحد فقط ولذلك فالصور المختزلة تكتب NADH و NADPH. تحت الظروف الموجودة في الخلية فان ذرتي الهيدروجين الملونتين تنفصلان عن هذه المواد الحامضية.

النيكوتيناميد هو أحد أفراد مجموعة فيتامينات ب وهو لذلك عنصر هام جداً في غذاء الانسان. لاحظ في الشكل (٧-٤) أن إحدى ذرات النتروجين في النيكوتيناميد تحمل شحنة موجبة واحدة ولهذا السبب غالبا مانرمز للجزىء كله بالرمز NDA^+

في الباب (٣) عرفنا الأكسدة بأنها نزع إليكترونات من المادة. في الخلايا تتم أغلب

عمليات الأكسدة بانتزاع ذرات هيدروجين (كل منها لها إليكترونها) ويلعب NAD^+ دوراً حرجاً في هذا الصدد. فكل جزيء NAD^+ يستطيع إكتساب (ومن ثم يختزل بواسطة) إثنين من الاليكترونات. ومع ذلك فان بروتون واحد يصاحب عملية النقل أما الآخر فانه ينطلق في الوسط المحيط. وعلى ذلك فان الصورة المختزلة NAD يمكن تمثيلها بكل دقة بالرمز NADH. ولكنها إكتسبت أثنين من الاليكترونات ويمكن تمثيل كل التفاعل كالاتي :

$$NAD^+ + 2H \rightarrow NADH + H^+$$

يشارك NAD في عدد كبير من تفاعلات الأكسدة والاختزال في الخلايا بما في ذلك الجلكزة والعديد منهم في التنفس الخلوي. ومع ذلك فان بعض تفاعلات الأكسدة والاختـزال في الخلايا تستخدم المركب المشابه له وهو نيكوتيناميد أدنين داينيوكليوتيد فوسفات Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate أو NADP وهو ببساطة عبارة عن NAD به مجموعة فوسفات ثالثة متصلة كما هو مبين في الشكل (٧-٤) ويتم إختزال NADP بنفس الطريقة التي يختزل بها NAD وسوف نرى في الباب التالي أن NADP هو عامل الاختزال المستخدم في البناء الضوئي. كذلك يعمل NADP كعامل إختزال في تفاعلات بنائية أخرى في كل من النباتات والحيوانات.

٧-٤ . الجلكزة : شحن المضخة

GLYCOLYSIS : PRIMING THE PUMP

الخطوة الاولى في الجلكزة هي نقل مجموعة فوسفات من ATP الى ذرة الكربون رقم ٦ في الجلوكوز (الشكل ٧-٥) يحدث هذا التفاعل مع فقد حوالي ٤ كيلو سعر من الطاقة الحرة. ومن حيث أن كسر الرابطة عاليـة الطاقة الطرفية في ATP ينتج على الاقل ٧,٣ كيلو سعر فإننا نعلم أن جزيء جلوكوز -٦- فوسفات الناتج قد إكتسب طاقة حرة ويمكن القول أنه قد تم تنشيطه.

هذه الخطوة هي مثال جيد لازدواج تفاعل يطلق الطاقة مع تفاعل مستهلك لها. ويمكن التعبير عن التفاعلين كالآتي :

$$\text{Glucose} \rightarrow \text{glucose 6-phosphate}, \ \Delta G = +3.3 \text{ Kcal}$$
$$\text{ATP} \rightarrow \text{ADP}, \qquad \Delta G = -7.3 \text{ Kcal}$$

المجموع $\text{Glucose} + \text{ATP} \rightarrow \text{glucose 6-phosphate} + \text{ADP}, \ \Delta G = -4 \text{ Kcal}$

وبعد التحول الانزيمي للجلوكوز ٦- فوسفات إلى شبيهه الفركتوز ٦- فوسفات ينقل جزيء ATP آخر مجموعة فوسفات ثانية ولكن هذه المرة إلى ذرة الكربون رقم ١ . المركب الناتج وهو الفركتوز ١ , ٦- ثنائي الفوسفات يكتسب مرة أخرى القليل من الطاقة الحرة في هذه التفاعل.

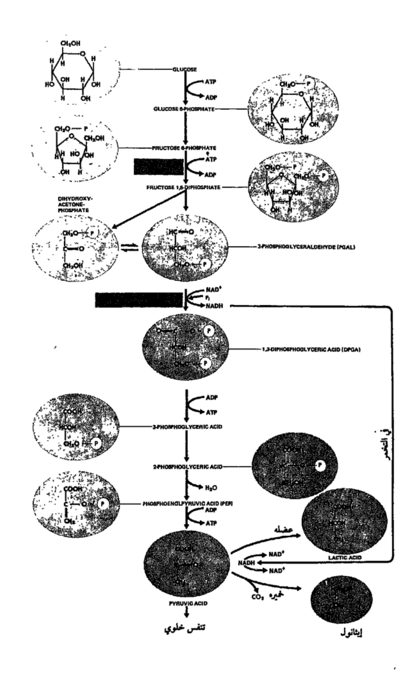
الخطوة التالية في الجلكزة هي الانشطار الانزيمي للفركتوز ١ , ٦- ثنائي الفوسفات إلى شطرين كل منهما يحتوي على ثلاث ذرات كربون. أحدهما يسمى ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات أمـا الثاني فهو ٣- فوسفو جليسر الدهايد *3-Phospho Glycer Al-dehyde* أو PGAL. وكما يتضح من الشكل (٧-٥) فان هذين الجزيئين متشابهين isomers وهما في الواقع على إستعداد للترابط فيما بينهما بواسطة إنزيم آخر من إنزيمات الجلكزة. لاحظ كذلك أننا لو تمكنا من إنتزاع مجموعات الفوسفات فاننا نحصل في الواقع على نصفي جزيء جلوكوز:

$$(C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_3H_6O_3)$$

٧-٥ الجلكزة : الأكسدة الأولى
GLYCOLYSIS : THE FIRST OXIDATION

الخطوة التالية في الجلكزة ذات أهمية خاصة. فهي ليست فقط حرجة بالنسبة للجلكزة ومن ثم بالنسبة للتنفس الخلوي ولكنها أيضا نموذج للعملية التى تتكرر لاطلاق الطاقة في الخلايا.

يتم إنتزاع إثنين من الاليكترونات (في صورة ذرات هيدروجين) من جزيء ٣- فوسفو جليسر الدهايد (PGAL) ونقلهما إلى جزيء NAD. هذا بالطبع تفاعل أكسدة واختزال فيه يتأكسد PGAL ويُختزل NAD. الانزيم الذي يحفز هذا التفاعل هو ٣ -



الشكل ٧-٥ . مسار الجلكزة. جميع هذه التفاعلات تحدث في سائل الخلية. في كل من التخمر الكحولي و تخمر حامض اللاكتيك تستعمل الاليكترونات المنزوعة من PGAL بواسطة NAD لاختزال حامض البيروفيك. ومع ذلك ففي التنفس الخلوي تعبر هذه الاليكترونات إلى داخل الميتوكوندريا.

فوسفو جليسر الدهايد دي هيدروجينيز. وحالما يغادر جزيء المركب الناتج الانزيم يتم إعطاؤه مجموعة الفوسفات اللاعضوية الموجودة في الخلية. الجزيء الناتج يسمى حامض ١,٣- ثنائي فوسفو الجلسريك أو:

(DPGA) 1,3-Di PhosphoGlyceric Acid

أكسدة PGAL إلى DPGA هي عملية منتجة للطاقة تبلغ فيها قيمة ΔG حوالى ٦٤ كيلو سعر تصبح متاحة للخلية. من هذه الطاقة يتم إختزان ٥٢ كيلو سعر في الصورة المختزلة من NAD. كذلك يتم إختزان ١١,٨ كيلو سعر في الرابطة التي تتصل بها مجموعة الفوسفات الجديدة مع الجزيء وبذلك تضاف رابطة عالية الطاقة إلى هذا الجزيء. في الخطوة التالية مباشرة من الجلكزة تنتقل مجموعة الفوسفات هذه إلى جزيء ADP فتحوله إلى ATP. تحويل ADP إلى ATP يتطلب على الأقل ٧,٣ كيلو سعر كما رأينا من قبل وبذلك تكون الطاقة الزائدة المختزنة في DPGA كافية لنقل الطاقة.

بعد تحول الجزيء أحادى الفوسفات حامض ٣- فوسفوجليسريك إلى شبيهه حامض ٢ - فوسفوجليسريك ينتزع منه جزيء ماء. هذه العملية تحول مجموعة الفوسفات الباقية إلى صورة عالية الطاقة (على حساب طاقة الروابط في أماكن أخرى من الجزيء) ثم يتخلى حامض فوسفو إينول بيروفيك Phos-pho Enol Pyruvic acid (PEP) عن مجموعة الفوسفات عالية الطاقة ليحول جزيء آخر من ADP إلى ATP. والمركب الناتج هو حامض البيروفيك ($C_3H_4O_3$ pyruvic acid) وكما ترى فانه يكافيء نصف جزيء جلوكوز ($C_3H_6O_3$) تمت أكسدته حتى فقد إثنين من الاليكترونات (في صورة ذرتين من الهيدروجين).

ما هو مصير حامض البيروفيك؟ سوف ندرس ثلاث طرق رئيسية تتناول بها الخلايا حامض البيروفيك الناتج من الجلكزة. هذه هي تخمر حامض اللاكتيك والتخمر الكحولي والتنفس الخلوي.

٧-٦. تخمر حامض اللاكتيك LACTIC ACID FERMENTATION

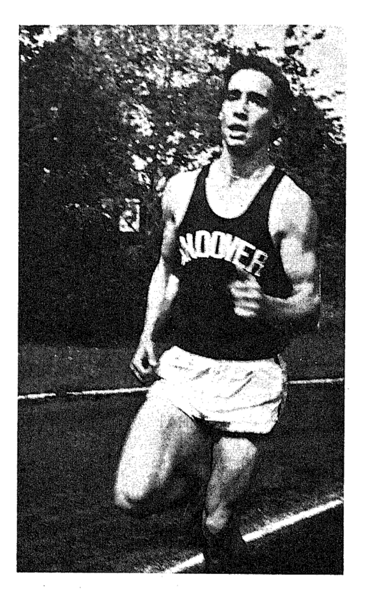
في الخلايا الحيوانية مثل تلك الموجودة في عضلة مرهقة وحيث يكون الأوكسجين غير كاف للتنفس الخلوي يتم إختزال حامض البيروفيك إلى حامض لاكتيك. العامل

المختزل هو NADH . الطاقة المختزنـة في NADH تنتقل مرة أخرى إلى الجزىء الكربوهيدارتي.

ما الفائدة من ذلك؟ تذكر أننا بدأنا بجزىء جلوكوز يحتوي على طاقة إحتراق حرة مقدارها ٦٨٦ كيلو سعر وقد أنتجنا جزيئين من حامض اللاكتيك يحتوي كل منهما على طاقة إحتراق حرة مقدارها حوالي ٣١٩,٥ كيلو سعر. وعلى ذلك تكون هناك حصيلة من الطاقة الحرة مقدارها ٤٧ كيلو سعر (٦٨٦-٢ × ٣١٩,٥ = ٤٧). كذلك فعلى الرغم من أننـا إحتجنـا إلـى جزيئـين من ATP لبدء العملية فقد نتج من الجلكزة أربعة جزيئـات ATP (إثنان من جزيئي DPGA واثنان من جزيئي PEP). وعلى ذلك فان الجلكزة تنتج حصيلة مقدارها جزيئين ATP لكل جزىء جلوكوز. فاذا كان ١٤,٦ كيلو سعر من الطاقة مختزنة فيهما (٢×٧,٣) فان حوالي ٣١٪ من الطاقة الحـرة (٤٧ كيلـو سعـر) قد تم تخزينها في صورة ATP . وفي الواقع فان هذا التقدير للكفاءة فيه تحفظ كبير.

وعنـدمـا نعلم أن جزيئي حامض الـلاكتيك يحتويان على ٦٣٩ من أصل ٦٨٦ كيلوسعر كانت موجودة في الجلوكوز فان العملية تبدو غير مجدية حيث لم ينطلق سوى ٧٪ فقط من الطاقة (وثلث هذه الكمية فقط إختزن في ATP). معظم الطاقة الموجودة في الوقود (الجلوكوز) مازالت حبيسة في النفايات (حامض اللاكتيك) كما أن هذه العملية لاتخلو من إحتـمالات الخـطر كذلك. فحامض اللاكتيك كما هو واضح من الاسم حامض وانتاجه في خلية عضلية من شأنه أن يخفض الأس الهيدروجيني إلى الدرجة التي تضطرب معها وظائف الخلية. ومع ذلك فان تخمر حامض اللاكتيك يعمل كمصدر للحصـول على ATP بالنسبـة للخـلايا التي تحتـاج إليه بشـدة لأنها لاتستطيع تأمين إحتياجاتها من الأوكسجين اللازم للتنفس الخلوي (الشكل ٧-٦).

وقد تتساءل لماذا تكون هناك حصيلة من الطاقة في تخمر حامض اللاكتيك؟ فجزىء حامض اللاكتيك ليس بأكثر تأكسداً من جزىء الجلوكوز وبالنظر إلى صيغتـه الجزيئيـة $C_3H_6O_3$ فانه يبـدو أن كل مـا أنجـزتـه الجلكـزة هـو تكسيـر جزىء الجلـوكـوز إلـى جزيئيـن ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_3H_6O_3$) وهذا صحيح إلى حد ما ولكن الفحص الدقيـق يبرهن على حدوث ماهو اكثر من ذلك. فإحدى نهايتي الجزىء ($-CH_3$). أكثر إختزالا مما في المركب الكربوهيدراتي بينما الأخرى ($-COOH$) اكثر تأكسدا. وعلى ذلك تكون



الشكل ٧-٦. في جريه نحو خط النهاية يستخدم هذا العدَّاء عملية تخمر حامض اللاكتيك اللاهوائية لاستكمال الطاقة الناتجة من التنفس الخلوي. بعد السباق يتم سداد دين الأوكسجين الذي تسبب فيه التخمر.

هناك عملية أكسدة واختزال داخلية وهذه هي العملية التي تؤدي إلى حصيلة ضئيلة من الطاقة الحرة.

٧-٧. التخمر الكحولي ALCOHOLIC FERMENTATION

الجلكزة في الخميرة تسير على نفس خطوات المسار السابق بالضبط ما عدا الخطوة الأخيرة. ففي الخميرة يتم نزع الكربوكسيل (نزع CO_2) من حامض البيروفيك قبل ان يتم إختزالة بواسطة NADH . النتيجة إذن هي جزيء من CO_2 وجزيء من الايثانول.

(في الواقع جزيئان من كل منهما لكل جزىء جلوكوز يتخمر)

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

وكما كان الحال في تخمر حامض اللاكتيك فان هذه العملية فيها الكثير من الخسائر. فمعظم الطاقة المختزنة في الجلوكوز مازالت مختزنة في الايثانول (وهذا يفسر الاستعمال الشائع للايثانول كوقود في الآلات عالية الأداء). كذلك كما كان الحال في تخمر حامض اللاكتيك فان هذه العملية خطيرة. فالخميرة تتسبب في التسمم لنفسها حينما يصل تركيز الايثانول إلى حوالى ١٣٪ (وهذا يفسر القيمة القصوى للمحتوي الكحولي في المشروبات الناتجة من التخمر مثل النبيذ . لانتاج مشروبات ذات محتوي كحولي أعلى لابد من تركيز الكحول بالتقطير). وأيضا كما كان الحال في تخمر حامض اللاكتيك لاحظ أن التخمر الكحولي قد أخذ مادة كربوهيدراتية ($C_3H_6O_3$) وأكسد ذرة كربون بالكامل (إلى ثاني أكسيد كربون CO_2) بينما تم اختزال الذرات الباقية (CH_3CH_2OH).

٨-٧ . التنفس الخلوي CELLULAR RESPIRATION

الطريقة الثالثة التي تستخدم الخلايا فيها حامض البيروفيك هي إستعماله كمادة لبداية التنفس الخلوي. إختزال حامض البيروفيك إلى حامض لاكتيك (أو إلى إيثانول وثاني اكسيد كربون) هو في الواقع عملية بنائية مستهلكة للطاقة. حامض البيروفيك يعمل كمستقبل للاليكترونات المنزوعة سابقًا من PGAL . حامض اللاكتيك يحتوي على طاقة حرة أكبر مما في حامض البيروفيك والعملية إذن هي عملية تصاعدية مختزنة للطاقة . معظم الفائدة المرجوة من أكسدة PGAL- قد فقدت . وفي أحسن الأحوال نحصل على طاقة من ٧٪ فقط من الوقود المستعمل.

ماذا لو وجدنا مستقبل أفضل للاليكترونات المنزوعة من NAD ؟ ونعنى بمستقبل أفضل مستقبل acceptor يكون ذو سالبية كهربية أعلى بكثير مما في NAD. كما تعلم فان الأوكسجين له أعلى سالبية كهربية بين العناصر (ما عدا الفلور). نقل إثنين من الاليكترونات من NADH إلى O_2 ينتج حوالى ٥٢ كيلوسعر من الطاقة تصبح متاحة للخلية. كذلك إذا وجدنا طريقة لاستمرار أكسدة حامض البيروفيك فان الطاقة

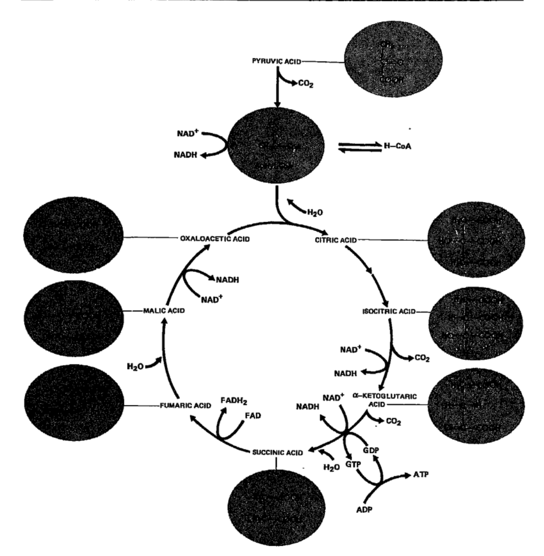
المختزنة فيه يمكن أن تصبح متاحة. يسعدني أن اسجل هنا أنه في بداية التطور تمكنت الكائنات الحية من : (١) إستعمال الأوكسجين كمستقبل نهائي للإكترونات المنزوعة من المواد الكربوهيدراتية و (٢) الأكسدة الكاملة لحامض البيروفيك. في الكائنات حقيقية النواة كلا من هذين النشاطين يحدث في الميتوكوندريا. هذه هي عملية التنفس الخلوي.

٧-٩. دورة حامض الستريك THE CITRIC ACID CYCLE

الأحداث الأساسية في التنفس الخلوي هي: (١) الأكسدة الكاملة لحامض البيروفيك بالتخلص على خطوات من كل ذرات الهيدروجين تاركة ثلاثة جزيئات من CO_2 و (٢) توصيل الاليكترونات المنزوعة كأجزاء من ذرات الهيدروجين هذه إلى عنصر الأوكسجين (O_2)

بمجرد وجود حامض البيروفيك داخل الميتوكوندريا تحدث خطوة أخرى في أكسدة حامض البيروفيك. وكما في حالة أكسدة PGAL يتم إنجاز ذلك بواسطة NAD . وكما سبق يتم التخلص من ذرتي هيدروجين وهذه تختزل NAD إلى NADH. وفي نفس الوقت يتم التخلص من جزىء ثاني أوكسيد كربون . الجزء الناتج يرتبط تساهمياً مع مرافق إنزيمي آخر هو المرافق الانزيمي أ coenzyme A لتكوين المركب المعقد المسمى أسيتايل - كو أ acetyl-CoA (الشكل ٧-٧). أسيتايل - كو أ يدخل الآن في سلسلة دائرية من التفاعلات الكيميائية تكتمل خلالها عملية الأكسدة. هذه السلسلة من التفاعلات تسمى دورة كربس Krebs cycle أو دورة حامض الستريك. الاسم الأول لتكريم العالم الذي إكتشفها أما الاسم الثاني فيعكس الخطوة الأولى في الدورة : إتحاد أسيتايل - كو أ مع حامض الأوكسالوخليك oxaloacetic acid لتكوين حامض الستريك. في هذه العملية يعاد توليد جزيء من أسيتايل - كو أ ويستعمل جزىء واحد من الماء. حامض الأوكسالوخليك رباعي الكربون وبه مجموعتي كربوكسيل وعلى ذلك فان حامض الستريك يحتوي على ٦ ذرات كربون وثلاث مجموعات كربوكسيل (حامض الستريك هو الحامض الموجود في ثمار الحمضيات أو الموالح مثل الليمون والبرتقال).

بعد خطوتين لاينتج عنهما سوى تكوين شبيه لحامض الستريك تحدث عملية أكسدة



الشكل ٧-٧. مسار التنفس الخلوي. تفاعلات دورة حامض الستريك (وتعرف بدورة كربس أو دورة الحامض ثلاثي الكربوكسيل) تؤدي إلى الأكسدة الكاملة خطوة بخطوة لمجموعة الأسيتايل الموجودة في أسيتايل كو أ. في الكائنات حقيقية النواة تحدث هذه التفاعلات في الميتوكوندريا.

أخرى يتوسط فيها NAD . مرة أخرى يتم إنجاز ذلك بالتخلص من جزيء ثاني أكسيد كربون . المركب الناتج هو حامض الفا - كيتوجلوتاريك ∝ - Ketog-lutaric acid وهذا بدورة يتأكسد ($NAD^+ + 2H \rightarrow NADH + H^+$) ويفقد مجموعة كربوكسيل ($-CO_2$). يصاحب هذه الخطوات إكتساب جزيء ماء. الناتج إذن به كربون أقل وذرة أوكسجين أقل. هذه هو حامض السكسنيك succinic acid.

التحول من حامض الفا-كيتوجلوتاريك إلى حامض السكسنيك يكون مصحوبا

بتغير في الطاقة الحرة مقدارة - ٨ كيلو سعر وهذا يكفي بالكاد للازدواج مع تخليق جزىء من ATP ‏(ΔG = + 7.3 Kcal.) . ويتم التخليق فعلا وان كان بطريق غير مباشر . أولا تتصل مجموعة فوسفات بالنيوكليوتيد (guanidine diphosphate) GDP جوانيدين ثنائي الفوسفات فتحوله إلى جوانيدين ثلاثي الفوسفات GTP ثم ينقل هذا الاخير مجموعة الفوسفات الطرفية عالية الطاقة الموجودة فيه إلى أدينوزين ثنائي الفوسفات ADP فيحولة إلى أدينوزين ثلاثى الفوسفات ATP.

الخطوة التالية في دورة حامض الستريك أشرنا إليهـا بإقتضاب في الباب (٦) . وهي أكسدة حامض السكسنيك إلى حامض الفيوماريك Fumaric acid. مرة اخرى يتم إنتزاع ذرتي هيدروجين ولكن المرافق الانزيمي هذه المرة يسمى الفلافين أدينين ثنائي النيوكليوتيد Flavin adenine dinucleotide (FAD) ويتم إختزال FAD إلى FADH.

مع دخول جزىء ماء آخر يتحول حامض الفوماريك إلى حامض الماليك malic acid . وعند أكسدة حامض الماليك بوساطة NAD ينتج جزىء من حامض الأوكسالوخليك وهو الجزىء الذي بدأ به هذا الجزء من القصة. وعند إعادة توليد حامض الأوكسالوخليك يستطيع جزىء آخر من أسيتايل - كو أ أن يدخل الدورة.

قد تجد هذه القصة معقدة ولكنها أنيقة . ربما يفيد أن تتوقف الآن لترى ماذا أحرزت مرة واحدة من هذه الدورة . في الأصل أدخلنا جزىء واحد من حامض الخليك (CH_3COOH - وان كان على هيئة أسيتايل - كو أ) إلى هذه الدورة ثم أضفنا جزيئين من الماء. وحدثت عمليتان لنزع الكربوكسيل وفي أربع مناسبات مختلفة تم التخلص من ذرتي هيدروجين. إذن يمكن التعبير عن هذه العملية كالآتي:

$$CH_3COOH + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 8H$$

تم التخلص من ذرات الهيدروجين بواسطة NAD ‏(FAD لأحد الأزواج) . ومصيرهم النهائي هو الاتحاد مع الأوكسجين (O_2) لتكوين جزيئات ماء. وعلى ذلك يكون حامض الخليك قد تمت أكسدته بالكامل إلى ثاني أوكسيد الكربون والماء. والآن دعنا نفحص عن قرب إنتقال ذرات الهيدروجين إلى الأوكسجين. هذه العملية أيضا تحدث في الميتوكوندريا.

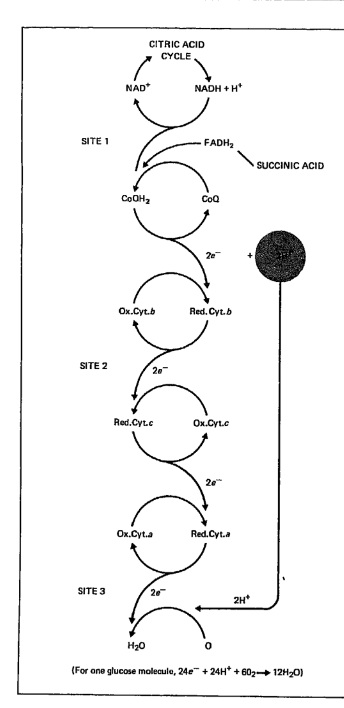
٧-١٠ . السلسلة التنفسية THE RESPIRATORY CHAIN

في القسم ٧-٥ ذكرنا أن أكسدة PGAL يمكن أن تتخذ كنموذج لكثير من خطوات التنفس الخلوي . وقد تتذكر أن DPGA الناتج من الأكسدة كان يحتوي على قدر من الطاقة الحرة أقل بكثير مما في PGAL . معظم الفرق (٥٢ كيلو سعر) كان مخزونا في NAD الذي إكتسب الاليكترونات المنزوعة من PGAL.

في كل من عمليتي الأكسدة الأخريين في التنفس الخلوي يحدث نفس الشيء تقريبا . من حامض البيروفيك إلى أسيتايل - كو أ . من حامض أيزوستريك إلى حامض الفا-كيتوجلوتاريك . من حامض الفا-كيتوجلوتاريك الى حامض سكسنيك . من حامض سكسنيك إلى حامض فيوماريك ومن حامض الماليك إلى حامض أوكسالوخليك . يحتوي الناتج في كل حالة على طاقة حرة أقل من المادة الداخلة في التفاعل ومعظم الفرق يختزن في NADH ($FADH_2$ في حالة واحدة) .

الطريق إلى الحصول على هذه الطاقة يكون بالعودة إلى أكسدة NADH بواسطة عامل أكسدة ذو سالبية كهربية أعلى . وبسبب سالبيته الكهربية العالية وسعة إنتشاره يكون الأوكسجين نموذجيا لهذا الغرض . أكسدة NADH بالأوكسجين تعطينا ٥٢ كيلو سعر ومع ذلك فان هذه القيمة أعلى بكثير مما يحتاجه تخليق جزيء واحد من ATP (أعلى قليلا من ٧,٣ كيلو سعر) ولذلك فالأكسدة المباشرة لـ NADH بالاوكسجين يمكن أن تؤدي إلى فقد كمية كبيرة من الطاقة الحرة في صورة حرارة . الأسلوب الأفضل - وهو المتبع في الميتوكوندريا - هو بتمرير الاليكترونات المنزوعة من NADH من خلال سلسلة متصلة من مواد مؤكسدة مختزلة redox substances قبل السماح لها في النهاية من الوصول إلى ذرات أوكسجين . كل من المواد المؤكسدة المختزلة هذه يمكنها أن تتاكسد وتختزل بالتبادل - تختزل كلما إستقبلت زوجاً من الاليكترونات من المادة ذات السالبية الكهربية الأقل وتتأكسد كلما أعطت هذه الاليكترونات إلى مادة لها سالبية كهربية أعلى . في كل خطوة من هذا التتابع توجد حصيلة من الطاقة الحرة . في ثلاث منها تكون الحصيلة كافية لتخليق جزيء ATP.

مواد الأكسدة والاختزال تشمل : (١) مرافق إنزيمي يسمى المرافق الانزيمي ك Coenzyme Q' - (٢) سلسلة من إنزيمات السيتوكروم Cytochrome و (٣) جزيئات



الشكل ٧-٨. السلسلة التنفسية. عند نزول الاليكترونات في هذه السلسلة فانها تعطى طاقة توجه في النهاية نحو تخليق ATP . حسب نظرية الأوزموزية الكيميائية فان الطاقة تستخدم أولا لضخ البروتونات الى خارج حشوة الميتوكوندريا ضد فرق تركيزهم. عند ثلاثة مواضع فقط في السلسلة (المواضع ١ و ٢ و ٣) ينطلق ما يكفي من الطاقة لانجاز ذلك. يتم تخليق ATP عندما تعود البروتونات، عدد البروتونات المبين هنا هو العدد المطلوب لاتزان المعادلة الكيميائية لأكسدة الجلوكوز. العدد الفعلى للبروتونات التي يتم ضخها الى خارج الحشوة كلما مركل زوج من الاليكترونات في هذا السلسلة غير مؤكد ولكنه على الاقل ٦.

الأوكسجين (O_2) (الشكل ٧-٨). كل واحد من أنزيمات السيتوكروم به جزيء هيم heme كمجموعة فعالة (الشكل ٧-٩). الهيم هو نفس المجموعة الفعالة المحتوية على حديد والتي سبق أن شاهدناها في الأصباغ الحاملة للأكسجين مثل الهيموجلوبين والميوجلوبين (انظر الشكل ٤-٢٣). السلسلة الكاملة من إنزيمات الأكسدة والاختزال

HEME

الشكـل ٧-٩. تركيب الهيم. يعمـل الهيم كمجمـوعـة فعـالة لانزيمات السيتوكروم وكذلك للميوجلوبين والهيموجلوبين. قارن تركيبة بتركيب الكلوروفيل (شكل ٨-٣).

في الميتوكوندريا تعرف باسم السلسلة التنفسية.

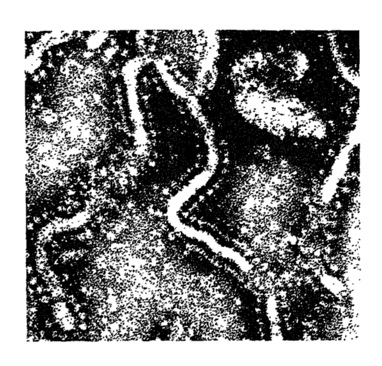
يبـدو أن مسـار الاليكترونات هو كالاتي: يتأكسد NADH بواسطة المرافق الانزيمي ك وهـذه الاكسـدة تنتـج طاقـة حرة تكفي للسـماح بتخليـق جزىء ATP من ADP وفوسفات غير عضوية. المرافق الانزيمي ك بدوره يتأكسد بواسطة سيتوكروم ب Cytochrome b ومن ثم يتأكسد هـو بواسطـة سيتوكـروم س Cytochrome C (الشكل ٧-٨). هـذه الخطـوة أيضا تنتج طاقـة تكفي للسماح بتخليق جزيء ATP. السيتوكروم س يختزل بعد ذلك معقد من إنزيمين همـا سيتوكـروم أ Cytochrome (a) وسيتوكروم أ٣ cytochrome a3 وللسهـولـة سنـذكـر هذا المعقـد باسم سيتـوكـروم أ. يتـأكسد السيتوكروم أ بذرة أوكسجين وتصل بذلك الاليكترونات إلى قاع السلسلة التنفسية. الأوكسجـين هو المـادة التي لها أعلى سالبية كهربية في السلسلة وهو المستقبل الأخير للاليكترونات. ينتج من السلسلة جزىء ماء وبالاضافة إلى ذلك فان الأكسدة النهائية تولد طاقة تكفي لتخليق جزىء ثالث من ATP.

٧-١١ . الازدواج بيـن نقل الأليكتـرونات وتخليق ATP
COUPLING ELECTRON TRANSPORT TO THE SYNTHESIS OF ATP

في الباب (٥) رأينا ان الميتوكوندريا تتكون من غشاء خارجي أملس وغشاء داخلي غزير الثنيـات. ثنيات الغشاء الداخلي المسماة بالزوائد Cristae تمتد في الوسط السائل الذي يملأ داخل الميتوكوندريا (الشكل ٧-١٠). توجد إنزيمات السلسلة التنفسية في الغشـاء الـداخلي للميتوكوندريا وبالاضافة إلى ذلك تلتصق الانزيمات ذات العلاقة بتخليق ATP بالجانب الداخلي للغشاء الداخلي (المواجة للوسط السائل). توضح صورة المجهر الاليكتروني في الشكل ٧-١١. صفوفا منتظمة من أزرار معنقة Stalked Knobs على هذا السطح الداخلي للغشاء الداخلي. كل من هذه الأزرار يمثل عبوة إنزيمية لتخليق ATP.



الشكل ٧-١٠. ميتوكوندريون مفرد، تبدو بوضوح الطريقة التي يبرز بها الغشاء الداخلي الى الداخل لتكوين الزوائد. بعض انزيمات دورة حامض الستريك وكل أنزيمات السلسلة التنفسية تكون متصلة بأغشية الزوائد (٨٠٠٠٠ مرة - بتصريح من كيث ر. بورتر).

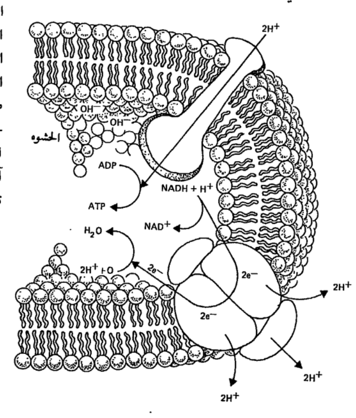


الشكل ٧-١١. أزرار على السطح الداخلي (المواجة للحشوة) للزوائد في ميتوكوندريون من كبد الفأر. وربما كان كل زر يمثل معقد أنزيمي مفرد خاص بتخليق ATP.
(٢٤٠٠٠٠ مرة - بتصريح من الدكتور دونالد ف. بارسونز - ساينس العدد ١٤٠ : ٩٨٥ - ١٩٦٣).

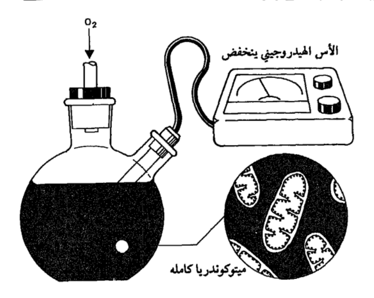
هناك عدة نظريات لتفسير كيف يؤدي مرور الاليكترونات عبر السلسلة التنفسية إلى تخليق ATP . النظرية التي توجد لها أقوي البراهين في الوقت الراهن تسمى نظرية الأوزموزية الكيميائية Chemiosmotic theory . هذه النظرية التي نادي بها بيتر ميشيل تقول ان سريان الاليكترونات يتسبب في إنتقال البرتونات (H^+) عبر أغشية الزوائد من الجانب المواجه للوسط السائل (الداخل) إلى الخارج (الشكل ٧-١٢). وكلما إستمرت العملية كلما ترسخ فرق التركيز بسرعة مع تركيز عالي من البروتونات في الخارج وتركيز منخفض في الداخل. ضخ البروتونات من منطقة التركيز المنخفض إلى منطقة التركيز المرتفع يخلق ضغطا أوزموزيا كيميائيا يشبه الضغط الأوزموزي الذي يتولد عن فرق تركيز جزيئات الماء. بالاضافة إلى ذلك فان تراكم الشحنات الموجبة في الخارج والشحنات السالبة على الجانب الداخلي للغشاء يخلق فرق جهد كهربي. ان الطاقة المخزونة في هذا النظام هي التي تستخدم في تخليق ATP.

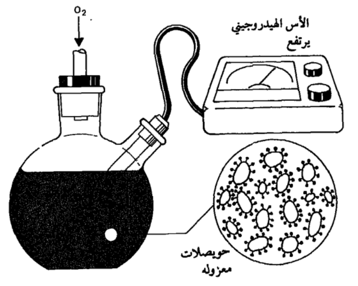
تخليق ATP يتم حفزه فعليا بواسطة معقد إنزيمي موجود في الأزرار التي تغطي السطح الداخلي للزوائد (الشكل ٧-١١). هذا المعقد الانزيمي هو البقعة الوحيدة على الغشاء التي يمكن للبروتونات عندها معاودة الدخول. وعندما تفعل ذلك فان الطاقة التي تتخلى عنها تنخرط في تخليق ATP.

هناك عدة سمات للميتوكوندريا تفسرها هذه النظرية. إحداها أن تخليق ATP يتوقف إذا حدث أي خلل في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا. إذا كان كل المطلوب لتخليق ATP هو مجرد المحلول الانزيمي لما كانت هناك حاجة للمحافظة على التكامل التركيبي للأغشية. هناك متطلب ثاني للنظرية وهو أن يكون غشاء الميتوكوندريا غير منفذ بالمرة للبروتونات إذا كان له أن يحافظ على فرق كبير في تركيزهم. ويبدو أن هذا صحيح. وفي النهاية فان القول بأن نقل الاليكترونات يتسبب في زيادة تركيز البروتونات خارج أغشية الزوائد يكون معناه أنه يتسبب في إنخفاض الأس الهيدروجيني (أي يصبح أكثر حامضية) هناك. الأس الهيدروجيني هو ببساطة مقياس لتركيز البروتونات (انظر القسم ٣-٩). وعند السماح لميتوكوندريا معزولة بالتنفس فانها تخفض الأس الهيدروجيني للوسط الذي توجد معلقة فيه (الشكل ٧-١٣). وعلى الجانب الآخر فانه عند تحطيم الميتوكوندريا فان الزوائد تتحرر وتكون حويصلات تكون فيها الأزرار التي تخلق ATP مواجة للوسط. مثل هذه التحضيرات لاتزال قادرة على نقل الاليكترونات وكلما فعلت ذلك إمتصت بروتونات من الوسط فترفع الأس الهيدروجيني له (الشكل ٧-١٣).



الشكل ٧-١٢. الازدواج بين تخليق ATP ونقل الاليكترونات حسب نظرية الاوزموزية الكيميائية. نقل الاليكترونات خلال انزيمات السلسلة التنفسية يتسبب، في ضخ البروتونات الى خارج حشوة الميتوكوندريا. تعود البروتونات من خلال جهاز آخر من الانزيمات وعندما تعود تذهب الطاقة المنطلقة الى تخليق ATP. العدد الفعلي للبروتونات التي يتم ضخها مع مرور كل زوج من الاليكترونات في السلسلة التنفسية والعدد المطلوب لتخليق كل جزيء من ATP قد يكون أكبر مما هو موضح هنا.





الشكل ٧-١٣. الدليل الذي يدعم نظرية الاوزموزية الكيميائية. التنفس في ميتوكوندريا كاملة يرسب البروتونات في الوسط المحيط بها فيخفض الاس الهيدروجيني. عندما يحدث التنفس في زوائد معزولة انقلبت على نفسها فانها تنزع البروتونات من الوسط المحيط بها فيرتفع الأس الهيدروجيني.

تبعا لنظرية الأوزموزية الكيميائية فانه لاحاجة لتفاعل إنزيمات السلسلة التنفسية مباشرة مع الانزيمات المستعملة في تخليق ATP . والأدله الكيميائية والأدله من المجهر الاليكتروني كلها تشير إلى أن هذين النظامين الانزيميين مستقلان تماما. بالاضافة إلى ذلك فان فرق تركيز البروتونات الناشيء عن السلسلة التنفسية يستطيع دفع تفاعلات أخرى مستهلكة للطاقة في الميتوكوندريا وهذه تشمل النقل النشط لأيونات الصوديوم (Na^+) من الوسط إلى الفراغ الخارجي وعلى ضوء ذلك فان الميتوكوندريا ليست فقط عضيات لتخليق ATP وانما هي بطارية ضئيلة يتم فيها تحويل الطاقة الكامنة في جزيئات الغذاء إلى طاقة كامنة مختزنة في فرق تركيز البروتونات وكذلك في فرق ضئيل

في الجهد الكهربي (حوالي ٠,١٤ فولت). هذه الطاقة تتحرر وتستعمل لتخليق ATP وفي تفاعلات اخرى مستهلكة للطاقة كلما سمح للبروتونات بمعاودة الدخول إلى حشوة الميتوكوندريا.

يبقي الكثير مما لم يكتشف عن الأوزموزية الكيميائية. ماهي بالتحديد الآلية التي يُحدث بها إنتقال الاليكترونات إنسياب البروتوناث نحو الخارج ؟ ماهي الآلية التي يزدوج بها إنسياب البروتونات نحو الداخل مع تخليق ATP ؟ كم عدد الاليكترونات المطلوبة لانجاز كل من هاتين الخطوتين؟ أيا كانت الاجابات عن هذه الأسئلة فان الواضح حتى الآن أننا لايمكن أن نعتبر الميتوكوندريا كمجرد أكياس إنزيمات. فقيامها بوظيفتها الصحيحة يتطلب التوجيه الدقيق لجزيئات الانزيمات التي تنقل الاليكترونات والبروتونات والانزيمات المتعلقة بتخليق ATP. إذن حتى على المستوى الجزيئى فان النجاح الوظيفي يعتمد على تركيب دقيق التنظيم.

٧-١٢. صحيفة الرصيد التنفسي : المواد

THE RESPIRATION BALANCE SHEET : MATERIALS

دعنا الآن نجرى محاسبة لكل المواد المتفاعلة والناتجة من التنفس الخلوي لجزىء واحد من الجلوكوز. ينشطر الجزىء الواحد من الجلوكوز إلى إثنين من الجزيئات ثلاثية الكربون (PGAL). كل من هذين الجزيئين يتعرض لست عمليات أكسدة متتابعة: خمس عمليات نزع هيدروجين بواسطة NAD وواحدة بواسطة FAD. كل جزىء PGAL يعطي إذن ما مجموعة ١٢ إليكترون (و H^+) وبذلك يكون المجموع للجزيئين من PGAL الناتجين من الجلوكوز هو ٢٤. وعلى ذلك فان ٢٤ إليكترون، (و ٢٤ بروتون) يتحدون في النهاية مع ١٢ ذرة أوكسجين ($6O_2$) لتكوين ١٢ جزىء ماء.

عمليات نزع الكربوكسيل تحدث في ثلاثة مواضع (حامض البيروفيك و حامض الستريك وحامض الفا - كيتوجلوتاريك). تذكر أنه بسبب إكتمال الدورة مرتين لكل جزىء جلوكوز فاننا نحصل على مجموع ٦ جزيئات من ثاني أكسيد الكربون ($6CO_2$) لاحظ أيضا أن جزيئات الماء تدخل في ثلاث خطوات من العملية: تكوين حامض الستريك وحامض السكسنيك وحامض الماليك. عند ضم كل ذلك فاننا نحصل على

المعادلة العامة الآتية للتنفس الخلوي :

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 12H_2O$$

ماذا عن إنتاج ATP ؟ في خمس مرات مختلفة أثناء تكسير جزيء واحد من PGAL ينتـزع NAD زوجا من الاليكترونات ويمررهم عبر السلسلة التنفسية. كل زوج من الاليكترونات يؤدي إلى تكوين ثلاث جزيئات من ATP و على ذلك ينتج ١٥ جزيء ATP من جزيء PGAL بهذه العمليات التأكسدية ويكون المجموع ٣٠ جزيء ATP من كل جزيء جلوكوز. أضف إلى ذلك أن FAD ينتزع زوجا من الاليكترونات ولكنهما ينتجان جزيئين فقط من ATP إذ أنهما ينتقلان مباشرة إلى المرافق الانزيمي ك.وبذلك لايمـران بالخـطوة الأولى المنتجـة للطاقة في السلسلة التنفسية (الشكل ٧-٨). يتم تعـويض هذا النقص بواسطة جزيء ATP الوحيد الناتج من تحويل حامض الفا - كيتـوجلوتـاريـك إلى حامـض سكسنيـك . مـرة أخـرى لابـد أن تـدور الـدورة مرتيـن لكـل جزيء جلوكوز يتأكسد ويكون الناتج الاجمالي من هذه الآليات هو ٦ جزيئات ATP. أضف إلى ذلك جزيئين من ATP أنتجتهما الجلكزة ليكون المجموع الكلى في النهاية هو ٣٨ جزيء ATP تنتجهم أكسدة جزيء واحد من الجلوكوز (الشكل ٧-١٤).

٧-١٣ . صحيفة الرصيد التنفسي : الطاقة

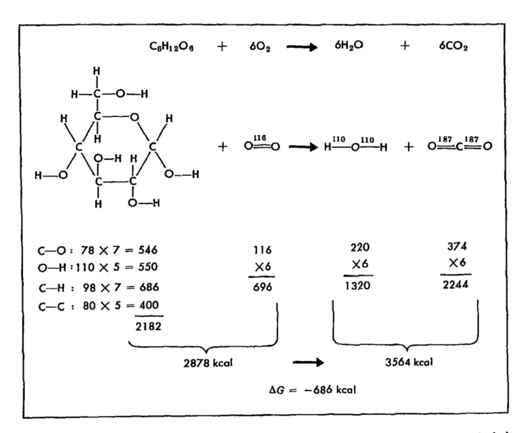
THE RESPIRATION BALANCE SHEET : ENERGY

لاحظنا من قبل أن إحتراق ١ مول من الجلوكوز يطلق ٦٨٦ كيلو سعر من الطاقة تكاد تكون كلها في صورة حرارة. ولكن التنفس الخلوي للجلوكوز يحبس بعض هذه الـطاقـة بتخليق ATP . ماهي الكمية المحبـوسـة؟ كل جزيء ATP يختزن (كتقدير متحفظ) ٧,٣ كيلو سعر. هذا يمثل حصيلة مقدارها ٤٠٪ (٢٧٧ / ٦٨٦) من الطاقة الحرة للجلوكوز وهو أداء أعلى بكثير من حصيلة ٧٪ الناتجة من تخمر الجلوكوز. على الرغم من أن الميتوكوندريا في خلايا الكبد وعضلات القلب في الثدييات تستطيع توليد ٣٨ جزيء ATP من كل جزيء جلوكوز يتم تنفسه فليست لكل الخلايا نفس هذه الكفاءة. بعض الخلايا حقيقية الأنوية الاخرى- مثل لك الموجودة في عضلات الطيران عند الحشرات - تولد ٣٦ جزيء ATP فقط بكفاءة تبلغ ٣٨٪ .

الشكل ٧-١٤. حصيلة ATP من التنفس الخلوي. على الرغم من أن الميتوكوندريا في خلايا الكبد وعضلات القلب في الثدييات تستطيع توليد ٣٨ جزيء ATP لكل جزيء جلوكوز يتم تنفسه فليست لكل الخلايا نفس هذه الكفاءة. بعض الخلايا حقيقية الأنوية الأخرى - مثل تلك الموجودة في عضلات الطيران عند الحشرات - تولد ٣٦ جزيء فقط - بكفاءة ٣٨٪.

انتاج ATP من	حصيلة الجلكزة	٢	ATP
التنفس الخلوي	أكسدة ٢ PGAL	٦	ATP
	أكسدة بواسطة NAD لكل من ٢ حامض بيروفيك، ٢ حامض أيزوستريك و ٢ حامض الفا-كيتوجلوتاريك و ٢ حامض ماليك	٢٤	ATP
	أكسدة بواسطة FAD لجزيئين من حامض سكسنيك	٤	ATP
	تحويل ٢ حامض الفا-كيتوجلوتاريك الى حامض سكسنيك	٢	ATP
	المجموع	٣٨	ATP

في الباب (٣) درسنا أساس التغير في الطاقة الحرة (ΔG) للتفاعلات الكيميائية ووجدنا أن ΔG تمثل الفرق بين الطاقة الحرة المنطلقة عند تكوين الروابط الموجودة في النواتج والطاقة اللازمة لكسر الروابط الموجودة في مواد التفاعل. في حالة التنفس الخلوي تكون مواد التفاعل (الجلوكوز و الأوكسجين) جزيئات من ذرات بينها فرق قليل أو بدون فرق في السالبية الكهربية وعلى ذلك تكون الروابط بينها تساهمية ولها متوسط طاقة روابط منخفض. هذا أسلوب آخر للقول بأنه يمكن كسر هذه الروابط بسهولة نسبيا. على الجانب الاخر فان النواتج (CO_2, O_2) هي جزيئات من ذرات بينها فرق ملحوظ في السالبية الكهربية وتتميز بروابط تساهمية قطبية ذات طاقة روابط عاليه. هذه روابط قوية تنكسر بصعوبة وتطلق كميات كبيرة من الطاقة عند تكوينها. لأن مجموع طاقة الروابط للنواتج (= الطاقة المنطلقة) أكبر منه لمواد التفاعل (= الطاقة اللازمة) يكون هناك حصيلة من الطاقة المنطلقة وبذلك يتم التفاعل بحيث تكون ΔG ذات قيمة سالبه.



الشكـل ٧-١٥ . علاقات طاقة الروابط في التنفس الخلوي. الفرق بين الطاقة الحرة اللازمة لكسر روابط مواد التفاعل والطاقة الحرة المنطلقة أثناء تكوين روابط النواتج هي ٦٨٦ كيلو سعر / مول وهو الحصيلة الصافية من الطاقة الحرة للتفاعل.

دعنـا ندرس العملية الآن بطريقـة كمية. الشكـل ٧-١٥ يعطى المعادلة العامة للتنفس الخلوي (مع إغفال جزيئات الماء الست الموجودة على الجانبين أي التي تلغى بعضهـا البعض من مواد التفـاعـل ومن النـواتج). ويعطي كذلك الصيغ التركيبية ومتوسط طاقة الروابط لكل رابطة. وكما ترى فان الروابط الأربع والعشرين للجلوكوز تتطلب ما مجموعه ٢١٨٢ كيلو سعر لكى تتكسر. الروابط المزدوجة الست للأوكسجين تتـطلب ما مجمـوعه ٦٩٦ كيلو سعر لكى تنكسر وبذلك يصبح المجموع الكلى هو ٢٨٧٨ كيلو سعر مطلوبة لكسر جميع روابط مواد التفاعل. بالنسبة للنواتج فان تكـوين ٦ جزيئـات من CO_2 تستلزم ١٢ رابطة مزدوجة تساهمية قطبية لكل منها طاقة رابطة مقدارها ١٨٧ كيلو سعر بحيث ينطلق ٢٢٤٤ كيلو سعر عند تخليق ٦ جزيئات CO_2. تكـوين ٢ من روابط O-H في جزيئات الماء يطلق ٢٢٠ (٢ × ١١٠) كيلو سعر من

الطاقة. بالنسبة لست جزيئات ماء يكون محصول الطاقة المنطلقة هو ١٣٢٠ كيلو سعر. وبذلك يكون المجموع بالنسبة للنواتج هو ٣٥٦٤ كيلو سعر. بطرح هذا الرقم من ٢٨٧٧ كيلو سعر المطلوبة لكسر روابط مواد التفاعل نصل إلى ٦٨٦ - كيلو سعر وهو التغير في الطاقة الحرة عند أكسدة الجلوكوز. هذه القيمة ثابتة عند أكسدة الجلوكوز بسرعة بواسطة الاحتراق أو بعملية التنفس الخلوي المنظمة.

٧-١٤ . بطارية التخزين الحيوية

THE STORAGE BATTERY OF LIFE

طوال هذا الباب (وكذلك الباب ٣) ساعدتنا السالبية الكهربية على فهم لماذا تسري الاليكترونات في الاتجاه الذي تسري فيه أثناء تفاعلات الاختزال والأكسدة. كما أعطتنا فكرة عامة عن العلامة (- أو +) وعن مقدار التغير في الطاقة الحرة (ΔG) الذي يمكن أن نتوقعه أثناء تفاعلات الاختزال والأكسدة. ولكننا نستطيع أن نجعل تحليلنا أكثر دقة. فالسالبية الكهربية يمكن أيضا التعبير عنها كفرق جهد في الاختزال والأكسدة (يرمز له بالرمز E). في هذه الحالة لابد أن يوجد معيار للمقارنة. المعيار الذي سوف نستعملة هو الهيدروجين وسوف نعطى للهيدروجين فرق جهد إختزال وأكسدة مقداره الصفر ($E = O$) . أي مادة ذات سالبية كهربية أعلى من الهيدروجين تعطى العلامة + لفرق جهد الاختزال والأكسدة. أي مادة لها سالبية كهربية أقل مما للهيدروجين تعطي علامة ـ لفرق جهد الإختزال والأكسدة. هذا مقياس كمى. كلما زاد الاختلاف في جهد الاختزال والأكسدة لمادتين (ΔE) كلما زادت قوة سريان الاليكترونات تلقائيا من المادة الأقل إيجابية إلى المادة الأعلى إيجابية (أي الأعلى في السالبية الكهربية). الاختلاف في الجهد (ΔE) إذن هو مقياس للضغط بينهما ونعبر عنه بالفولت.

عندما نقرب بين مادتين مختلفتين في E بحيث يكون هناك فرصة لسريان الاليكترونات بينهما فقد أنشأنا بطارية. وعلى الرغم من أنها قد تكون داخل إحدى الميتوكوندريا إلا أنها بطارية تماما كبطارية الرصاص - الحامض الموجودة في سيارة.

لك أن تتخيل أنه كلما زاد الفولت (أي ΔE) الموجود بين عنصري البطارية كلما زادت الطاقة المتاحة عندما تأخذ الاليكترونات في السريان. وفي الواقع يمكن تحديد

كمية الطاقة الحرة المتاحة من تلك البطارية. العلاقة هي :

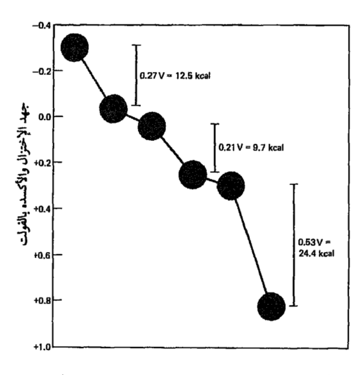
ΔG = - ن (٢٣,٠٦٢ كيلو سعر) ΔE

حيث ن هو عدد الاليكترونات المنقولة والرقم ٢٣,٠٦٢ كيلو سعر هو كمية الطاقة المنطلقة عندما يمر إليكترون واحد عبر إنخفاض في الجهد مقدارة فولت واحدة (يسمى ثابت فاراداى Faraday Constant). الكربون المختزل إلى الحد الموجود في المواد الكربوهيدراتية مثل الجلوكوز له جهد اختزال واكسدة حوالي - ٤٢,. فولت. الأوكسجين وله أعلى سالبية كهربية في هذا النظام يكون بالطبع له أكبر قيمة E وهي + ٨٢,. فولت. ΔE إذن هي + ١٫٢٤ فولت (الشكل ٧-١٦). اذا سمحنا بمرور ٢٤ إليكترون خلال هذا الجهد فان ذلك يعطينا حصيلة من الطاقة الحرة مقدارها - ٦٨٦ كيلو سعر (ΔG = - ٢٤ × ٢٣,٠٦٢ × ١,٢٤).

نفس هذا الأسلوب في التحليل قد يساعدنا على فهم الاستراتيجية المتبعة في السلسلة التنفسية. الشكل (٧-١٦) يبين جهد الاختزال والأكسدة للمواد NAD (-٠,٣٢ فولت) والمرافق الانزيمي ك (حوالى -٠,٠٥ فولت) وسيتوكروم ب (+ ٠,٠٣ فولت) وسيتوكروم س (+ ٠,٣٤ فولت) وسيتوكروم أ (+ ٠,٢٩ فولت) والأوكسجين (+ ٠,٨٢ فولت). الطاقة الحرة المنطلقة مع مرور الاليكترونات من خطوة إلى خطوة يمكن حسابها بسهولة باستخدام العلاقة السابقة. عند ثلاث مواضع فقط في السلسلة التنفسية ينتج الانخفاض في الجهد طاقة تكفي لضخ بروتونات ضد فرق التركيز. هذه هي : الانتقال من NAD إلى المرافق الانزيمي ك (ΔE = ٠,٢٧ فولت وبذلك تكون ΔG = - ١٢,٥ كيلو سعر) ومن سيتوكروم ب إلى سيتوكروم س (ΔE = ٠,٢١ فولت وبذلك تكون ΔG = - ٩,٧ كيلو سعر) ومن سيتوكروم أ إلى الأوكسجين (ΔE = ٠٫٥٣ فولت وبذلك تكون ΔG = - ٢٤,٤ كيلو سعر).

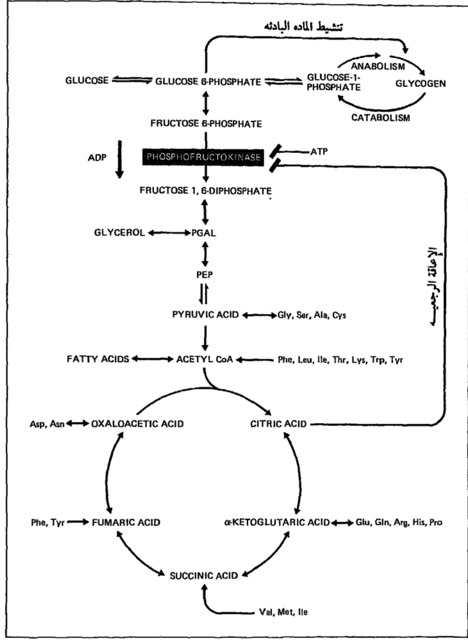
٧-١٥ . ماذا عن انواع الوقود الاخرى؟ WHAT ABOUT OTHER FUELS

لقد درسنا ببعض التفصيل نظاما أنيقا تنطلق فيه الطاقة المختزنة في الجلوكوز بعناية لكى تستعملها الخلية. ولكن الجلوكوز ليس هو الوقود الوحيد الذي تعتمد عليه



الشكل ٧-١٦. جهود الاختزال والأكسدة لمكونات السلسلة التنفسية. عند ثلاث خطوات في مرور الاليكترونات لأسفل يكون الانخفاض في الجهد (E) كافيا لاطلاق الكمية من الطاقة اللازمة لتخليق جزيء ATP

الخلية. فالمواد الكربوهيدراتية الأخرى والدهون وحتى البروتينات قد تستعمل في خلايا معينة أو في أوقات معينة كمصدر للطاقة وبعد أن رأيت الآلية المعقدة التي تستعمل بها الخلية الجلوكوز فانك قد تأمل ألا تحتاج إلى أنظمة مشابهة لكل نوع من الوقود. وفعلا لا حاجة لذلك. فاحدى المزايا الهامة لأكسدة الجلوكوز خطوة بخطوة إلى H_2O, CO_2 أن العديد من المركبات الوسيطة المتكونة أثناء هذه العملية تربط أيض الجلوكوز بأيض جزيئات الغذاء الأخرى. فمثلا عند إستعمال الدهون كوقود فان جزء الجليسرول من الجزيء الدهني يتحول إلى PGAL ويدخل في مسار الجلكزة عند تلك النقطة. الأحماض الدهنية تتحول إلى أسيتايل - كو أ وتدخل في المسار التنفسي (الشكل ٧-١٧). الأحماض الأمينية الناتجة من تميوء البروتينات يمكنها أيضا أن تكون وقود. أولا ينتزع منها النيتروجين بعملية تسمى نزع الأمين deamination . وتدخل الأجزاء المتبقية إلى العملية عند عدة نقاط. مثلا الأحماض الأمينية جلايسين Gly وسيرين Ser والألانين Ala والسيستين Cys تتحول إلى حامض بيروفيك وتدخل الميتوكوندريا لكي يتم تنفسها. الأسيتايل - كو أ يعمل كنقطة دخول للأحماض فينايل ألانين Phe والليوسين Leu و الأيزوليوسين Ile والثريونين Thr واللايسين Lys والتربتوفان Trp والتيروسين Tyr . حامض الأسبارتيك Asp والأسباراجين Asn



الشكل ٧-١٧ . التداخلات بين أيض الدهون والبروتينات والمواد الكربوهيدراتية . نواتج هضم الدهون (أحماض دهنية وجليسرول) والبروتينات (الأحماض الأمينية) تدخل إلى مسار التنفس الخلوي عند النقاط الموضحة . بعض هذه النقاط (مميزة بأسهم ذات رأسين) تعمل على تصريف المواد الوسيطة الزائدة الى المسارات البنائية التي تقود الى تخليق الدهون وبعض الأحماض الأمينية . الأسهم السوداء تبين تلك الخطوات التي يمكن للمسار الأيضي عندها أن ينعكس فقط باستعمال إنزيمات مختلفة . يبين الشكل كذلك إثنتين من نقاط التحكم الرئيسية في التنفس الخلوي . التنشيط الانزيمي مبين بسهم ثقيل والإعاقة الانزيمية مبينة بخط سميك .

يتحللان إلى حامض أوكسالوخليك بينما حامض الجلوماتيك Glu والجلوتامين Gln والأرجنين Arg والهستيدين His والبرولين Pro تدخل دورة كربس عند نقطة حامض الفا - كيتوجلوتاريك (الشكل ٧ - ١٧) هذه الروابط إذن تسمح بتنفس الزيادة من الدهون والبروتينات في الغذاء. وليست هناك حاجة إلى آليات خاصة للتنفس الخلوي عند تلك الحيوانات التي تعتمد بقدر كبير على الدهون (مثل معظم الطيور) أو البروتينات (مثل آكلات اللحوم) المأكولة لامدادها بالطاقة.

٧-١٦ . التحكم في التنفس الخلوي CONTROL OF CELLULAR RESPIRATION

لابد من التحكم في تشغيل نظام معقد مثل الجلكزة والتنفس الخلوي , فمثلا يجب أن تستجيب الخلية بفاعلية إلى الاحتياجات المتغيرة من ATP والتغير في الأوكسجين المتاح والمصادر المتغيرة للوقود (مثل الجلوكوز -- أحماض دهنية) المتاح لها. وقد تم إكتشاف عدة آليات لهذا التحكم.

دعنا نفحص واحدة من أهم نقاط التحكم. هذه هي النقطة التي يتحول عندها الفركتوز ٦- فوسفات الى فركتوز ١ , ٦ - ثنائي الفوسفات. هذا التفاعل يحفزه الانزيم فوسفو فركتوكينيز. يتأثر النشاط الحفاز للفوسفو فركتوكينيز بقوة بعدة مواد أخرى. التركيز المتزايد لمادة ADP مثلا يسرع من نشاط الانزيم. وهذا معقول تماما لأنه يسرع من عملية الجلكزة وبذلك يساعد في إعادة بناء مادة ATP المتاحة للخلية. في الجانب الآخر نجد أن التركيز المتزايد من مادة ATP يثبط نشاط الانزيم فيبطيء من انتاج ATP . هذا مثال للاعاقة الرجعية (انظر القسم ٦-١٠). تراكم حامض الستريك وهو مادة وسيطة في دورة كربس يثبط أيضا نشاط الفوسفو فركتوكينيز وكذلك إنتاج المزيد من حامض الستريك. فالفوسفو فركتوكينيز إذن هو مثال للانزيم الفراغي المغاير allosteric enzyme . فنشاطه بالنسبة لمادة تفاعله يتأثر كثيرا بوجود جزيئات أخرى تلتحم معه عند موضع ما على الجزيء غير الموضع الحفاز. وبهذه الطريقة ينضبط بدقة معدل الجلكزة حسب إحتياجات الخلية.

٧-١٧ . كيف تم التوصل الى هذه الاكتشافات ؟
HOW THESE DISCOVERIES WERE MADE ?

قد تحتار في كيفية إكتشاف علماء الكيمياء الحيوية لكل هذه الخطوات الوسطية في الجلكزة والتنفس الخلوي . وقد إحتاج ذلك إلى جهد العديد من العلماء لعدد كبير من السنين واستعمال طرق بارعة .

إحدى طرق دراسة الأيض الوسيط هي إضافة مادة يُظن أنها وسيطة ثم تتبع (١) ما إذا كانت قد إستهلكت و (٢) ماهي المواد الجديدة التي أخذت في التراكم . أحيانا تستعمل هذه الطريقة مع الكائن كاملا ولكن عادة تطبق على أعضاء معزولة أو حتى على خلاصة الخلية . فمثلا إكتشف هانز كربس أن حامض الستريك يتكون عند إضافة حامض البيروفيك وحامض أوكسالوخليك الى عضلة الحمام المفرية وقد مكنه هذا الاكتشاف من التوصل إلى تفاعلات الدورة التي تحمل اسمه الآن .

كذلك قدم لنا إستعمال المعوقات الانزيمية معلومات عن الأيض الوسيط . فمثلا التاثير السام لحامض المالونيك (انظر القسم ٦-٩) يرجع إلى اعاقته للسكسنيك دي هيدروجينيز وهو الانزيم الذي يحفز تحول حامض السكسنيك إلى حامض فيوماريك في دورة كربس . عند وجود حامض المالونيك فان مادة التفاعل العادية وهي حامض السكسنيك تتراكم ويمكن التعرف عليها . إذن عندما يمكن التعرف على المادة العادية التي ينتجها الانزيم فانه يمكن إضافة هذه المادة إلى النظام المسمم فاذا عاود التنفس نشاطه كما يحدث عند إضافة حامض الفيوماريك (الشكل ٧-٧) إلى الأنسجة المسممة بحامض المالونيك فان حلقة أخرى من حلقات السلسلة تكون قد إتضحت .

واحدة من أفضل طرق دراسة الأيض الوسيط هي إضافة جزيئات بها ذرات مشعة إلى نظام انزيمي . الظهور التدريجي للاشعاع في مواد كيميائية أخرى سوف يحدد مسار حدوث التغيرات الكيميائية . في الباب التالي سوف نرى كيف أمكن إستخدام هذه الطريقة في التوصل إلى واحدة من الخطوات الهامة في عملية البناء الضوئي .

٧-١٨ . إستخدامات الطاقة THE USES OF ENERGY

تقوم الجلكزة والتنفس الخلوي بتحويل الطاقة الحرة الموجودة بالغذاء إلى طاقة حرة مختزنة في ATP

ويعمل ATP بدوره كمصدر وسيط للطاقة بالنسبة لجميع أنشطة الكائن التي تتطلب طاقة. هذه الأنشطة تقع في عدة اقسام :

١ ــ الشغل الآلى MECHANICAL WORK

الحركة هي واحدة من عدة سبل عند الحيوانات لعمل شغل آلى. في جميع الأحوال يتم الشغل الآلى عن طريق إنقباض خلايا عضلية والقوة المبذولة أثناء إنقباض الخلايا العضلية تنتقل إلى تراكيب مهيأة للحركة. يتم إمداد الخلايا العضلية بالطاقة اللازمة لانقباضها بواسطة ATP . وكذلك يتم إمداد الأهداب والأسواط المتحركة (راجع القسم ٥-١٨) بالطاقة بواسطة ATP

٢ ــ النقل النشط ACTIVE TRANSPORT

لابد للخلايا من بذل طاقة لنقل الأيونات والجزيئات ضد إتجاه فرق التركيز أي لانجاز النقل النشط. وقد ذكرنا عدة أمثله للنقل النشط في القسم ٦-٥ . وربما كانت جميع حالات النقل النشط مرتبطة إرتباطاً وثيقا بانتاج واستخدام ATP في الخلية.

٣ ــ إنتاج الحرارة HEAT PRODUCTION

الطاقة هي أيضا مصدر للحرارة بالنسبة للكائنات الحية. الثدييات والطيور تعتمد بصفة خاصة على الحرارة المولدة داخليا ولذلك يمكنها المحافظة على درجة حرارة ثابتة لأجسامها رغم التقلبات في درجة حرارة الجو. وعموما يكون إنتاج الحرارة عبارة عن ناتج ثانوي من التحولات الأخرى للطاقة في الخلية. وكما رأينا فانه لايوجد تحول للطاقة تبلغ كفاءته ١٠٠٪. على سبيل المثال عندما تتحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة آلية (كما في حالة إنقباض العضلات) تفقد كمية كبيرة (٧٠-٨٠٪) من الطاقة في صورة حرارة. الانقباض العضلى اللا إرادى الذي نسميه بالرعشة يستغل عدم الكفاءة هذا في منع درجة حرارة الجسم من الهبوط إلى أقل من الدرجة العادية. والمصدر المباشر للطاقة اللازمة لانقباض العضلات هو كما رأينا ATP.

٤ ــ البناء ANABOLISM

البناء هو تخليق جزيئات كبيرة مثل البروتينات وعديدات التسكر والأحماض والنووية

من وحدات صغيرة. هذه التخليقات لايمكن أن تتم إلا بادخال طاقة. وسواء بطريق مباشر أو غير مباشر فان ATP هو مصدر الطاقة لجميع الأنشطة البنائية في الخلايا.

٧-١٩. البناء ANABOLISM

نواتج البناء تقوم بعدة وظائف أساسية فالجلايكوجين والدهون بل والبروتينات تعمل كوقود مخزون لعمليات الهدم اللاحقة. تخليق أحماض نووية جديدة يمكن الكائن من إختزان وانتاج نسخ إضافية من مكتبته المحتوية على المعلومات الوراثية. جزيئات البروتين والبروتين - كربوهيدرات والبروتين - ليبيدات هي عناصر تركيبية أساسية بالنسبة للكائن داخل وخارج الخلايا. وعندما يكون تخليق هذه المواد أسرع من تكسيرها ينمو الكائن.

جميع التحولات البنائية تحفزها إنزيمات تماما مثلما يحدث في التفاعلات الهدمية. ونظرا للسهولة النسبية التي يمكن بها عكس إتجاه العديد من التفاعلات الانزيمية فاننا نتوقع أن تعمل الانزيمات المعنية بالهدم في البناء أيضا و ذلك عن طريق تغيير التركيز النسبى للمواد على جانبي المعادلة. وفي الواقع فان بعض المسارات البنائية تستخدم فعلا بعض الانزيمات ذات العلاقة بالمسارات الهدمية (عديد من الامثلة موضح في الشكل ٧-١٧ بأسهم ذات رأسين). إحدى وظائف خلايا الكبد هي تحويل حامض اللاكتيك الناتج من التخمر في العضلات مرة أخرى إلى جلوكوز ٦- فوسفات ثم إلى جلوكوز (يذهب إلى الدم) أو إلى جلايكوجين (للتخزين). خلايا الكبد تستعمل العديد (وليس كل) إنزيمات الجلكزة لهذا الغرض. وربما لايوجد مسار هدمى واحد يمكن عكس إتجاه بالكامل بدون تدخل بعض إنزيمات فريدة في عملية البناء. من أجل أن يتم تخليق الجلوكوز ٦- فوسفات إلى جلايكوجين لابد من توفر ثلاثة إنزيمات ليست هي الإنزيمات التي تحفز تحول الجلايكوجين إلى جلوكوز ٦- فوسفات (الشكل ٧-١٧).

الانفصال الجزئي للمسارات البنائية والهدمية هو إستراتيجية جيدة بالنسبة للخلية. فبعض التفاعلات الهدمية تكون غير عكسية ولا بد من إيجاد وسيلة أسهل لمعاودة صعود المسار الأيضى. كذلك فان فصل خطوات البناء عن خطوات الهدم يمكن الخلية من ممارسة آليات منفصلة للتحكم في كل عملية. فمثلا تراكم الجلوكوز ٦- فوسفات

يمكن أن يقود إلى تزايد التنفس الخلوي كنتيجة لتزايد إحدى مواد التفاعل في تفاعل عكسي . ولكن ذلك يكون ملائما فقط عندما تعاني الخلية من نقص في ATP . وفي الواقع يتحكم مستوى ATP في هذا المسار الهدمي (بواسطة الفوسفوفركتوكينيز) كما رأينا في القسم ٧-١٥ . ومع ذلك يقوم الجلوكوز ٦- فوسفات بتنشيط الانزيم الأخير في تخليق الجلايكوجين (تنشيط المادة البادئة - انظر القسم ٦-١٠) وسوف ينسحب إلى هذا المسار البنائي إذا لم يكن مستخدما في التنفس الخلوي . وتجدر الاشارة هنا إلى أن التفاعلات البنائية والهدمية غالبا ماتكون منفصلة مكانياً أيضا . فقد عرفنا الدور الذي تلعبه الميتوكوندريا في الهدم . بينما يتطلب العديد من التفاعلات البنائية إنزيمات سيتوبلازمية أو الانزيمات الموجودة على الشبكة الاندوبلازمية وفي أماكن اخرى .

يختلف تخليق البروتينات والأحماض النووية من وحداتها الأصلية في ناحية جوهرية عن تخليق عديدات التسكر والدهون . النشا (الجلايكوجين) والسيليلوز هي بلمرات مركبة من نفس الوحدات وهي الجلوكوز . تشترك عدة أصناف من الأحماض الدهنية في تركيب الدهون ولكن تركيب الجزيئات يكون بسيط للغاية . إلى حد ما تكون هذه الجزيئات الكبيرة متشابهة أيا كان الكائن الذي توجد فيه . ولكن الموقف يختلف تماما في تخليق البروتينات والأحماض النووية . فهذه الجزيئات هي بلمرات معقدة والتتابع المطلق الذي تترتب به الوحدات فيها جوهري جداً لوظائفها . لايمكن تخليقها ببساطة عن طريق عكس الهدم لانه لابد من تخليقها بعملية تجميع لوحداتها في ترتيب محدد . هذه الجزيئات إذن تحتوي على معلومات وهذه المعلومات في بعض الأحيان تكون فريدة للكائن الذي يتم تخليقها فيه . في أجسامنا قد نهدم البروتين البقري أو بروتين البقول ولكننا نبنى فقط بروتين الانسان . الآليات التي نبنى بها تتابعات دقيقة التنظيم من الوحدات في أحماضنا النووية وبروتيناتنا هي موضوع الباب ١٣ .

وكما تنطلق الطاقة من الهدم فان البناء يتطلب طاقة . وبالطبع فان الطاقة المنطلقة بالهدم - في صورة ATP - هي التي تستخدم في البناء . من أجل أن تتجمع الأحماض الأمينية لتكوين بروتينات فانه لابد من تنشيطها أولا . الطاقة اللازمة لذلك تأتي من ATP . الوحدات البنائية للأحماض النووية هي نيوكليوتيدات بها روابط فوسفاتية عالية الطاقة إحداها في الواقع هي ATP . البقية (أي UTP , CTP , GTP للحامض RNA ومشتقاتها منزوعة الأوكسجين للحامض DNA) تتلقى روابطها الفوسفاتية عالية

الطاقة من ATP . ومن أجل أن تتجمع جزيئات الجلوكوز لتكوين النشا أو السيليلوز فانه لابد من تنشيطها أولا . وتأتي الطاقة اللازمة لذلك من ATP . تخليق الدهون أيضا يتطلب ATP .

في مناقشتنا للتنفس الخلوي (القسم ٧-١٥) لاحظنا العديد من المركبات الوسيطة التي تربط هدم المواد الكربوهيدراتية بهدم الدهون و البروتينات (الشكل ٧-١٧). نقاط الربط هذه تعمل كصمامات ذات إتجاهين فهي بمثابة نقاط دخول ليس فقط إلى هدم (تنفس خلوي) الأحماض الدهنية والجليسرول والأحماض الامينية ولكن أيضا إلى تخليقها. وعلى ذلك فان هدم النشويات يمكن أن يؤدي (من خلال أسيتايل - كو أ و PGAL) إلى تخليق الدهن وكثيرا ما يحدث ذلك. الكثير من البروتين الذي نستهلكه يتحول في النهاية إلى جلوكوز ليعمل كوقود للمخ وللأنسجة الأخرى. وعلى الرغم من أن كل أغذيتنا قابلة للتحول إلى بعضها البعض بدرجة ما فان ذلك لايحدث بالكامل. وبعبارة أخرى لايوجد غذاء واحد يستطيع أن يغطى كل إحتياجاتنا البنائية. يمكننا بالفعل تخليق دهون عديدة من الجلوكوز ولكن دهون معينة (غير مشبعة) لايمكن تخليقها ولابد من الحصول عليها مباشرة مع الغذاء. وعلى الرغم من أننا نستطيع تخليق ١٢ حامض أميني من أصول كربوهيدراتية فانه لابد لنا من الحصول على ثمانية أحماض أخرى (الأحماض الأمينية " الأساسية "essential") مباشرة.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

في هذا الباب درسنا الآلية المعقدة التي تستغل بها الخلايا الحية الطاقة الحرة للجزيئات العضوية في القيام بنشاطاتها المختلفة. من أهم النشاطات التفاعلات البنائية التي يتم فيها تخليق التجمعات المنظمة و المعقدة من الجزيئات الكبيرة في الخلية. كل العملية - ومن ثم الحياة نفسها - تعتمد على الازدواج بين التفاعلات الهدمية التي تطلق الطاقة الحرة (G △-) و التفاعلات البنائية التي تختزنها (G △ +) ولكن هذه الازدواجات لاتقترب من الكفاءة التامة حيث يفقد دائما قدر من الطاقة على هيئة حرارة. الحرارة لاتستطيع أداء عمل (طاقتها لم تعد حرة) ولذلك لو كانت القصة التي رويناها هي كل القصة لنضب معين الطاقة الحرة منذ زمن بعيد وتوقفت الحياة.

بتعبير مجازي آخر فاننا خصصنا هذا الباب لدراسة طريقة تفريغ بطارية الحياة.

ولكن إذا كان لأى بطارية أن تستمر في أداء عملها فانه لابد من إعادة شحنها من وقت لآخر . إعادة شحن بطارية الحياة يتم بالنباء الضوئي وهو الموضوع التالي في دراستنا .

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ ماهو الغذاء الذي يطلق أكبر كمية من الطاقة؟
٢ ــ ما هي الاختلافات بين التخمر الكحولي وتخمر حامض اللاكتيك؟
٣ ــ باستخدام البيانات في الشكل ٣-٢٣ إحسب الطاقة الحرة المنطلقة ($- \Delta G$) عندما يحترق ١ مول من حامض البالميتيك ($C_{15}H_{31}COOH$) لتكوين ثاني أكسيد كربون وماء.
٤ ــ ماهي أوجه التشابه بين عمليتي صناعة الخبز وصناعة البيرة ؟ وما هي أوجه الاختلاف بينهما؟
٥ ــ ماهي الحصيلة النهائية من ATP الناتج من تنفس ١ مول من الجلوكوز إذا حدثت الجلكزة في الميتوكوندريا وليس في السائل الخلوي؟
٦ ــ لماذا يستخدم السعر أيضا كمقياس للطاقة الكيميائية وهو وحدة الطاقة الحرارية؟
٧ ــ كم عدد المولات التي تستهلك عند تنفس ٢ مول من الجلوكوز؟ وكم عدد المولات من ثاني أوكسيد الكربون تنتج؟
٨ ــ ما هي النسبة بين مولات الأوكسجين المستهلك ومولات ثاني أوكسيد الكربون الناتج من تنفس الجلوكوز؟
٩ ــ ماذا يحدث لهذه النسبة عندما تستخدم الدهون كوقود في التنفس الخلوي؟
١٠ ــ لماذا يتم تخمير المشروبات الكحولية عادة في حاويات محكمة الاغلاق؟
١١ ــ ماهو أكبر وزن من الكحول يمكن أن تنتجه خلايا الخميرة من ٩٠ جم جلوكوز؟
١٢ ــ ماذا تكون الحصيلة النهائية من جزيئات ATP حينما يستخدم الجلايكوجين بدلا من الجلوكوز لانتاج الجلوكوز فوسفات في التنفس الخلوي؟
١٣ ــ ماهي حصيلة الطاقة الحرة عندما يمر ١ مول من أزواج الاليكترونات من سيتوكروم س إلى سيتوكروم أ ؟ هل يمكن إستغلال هذه الخطوة في تخليق ATP إشـــرح .

REFERENCES المراجع

1. CHAPPELL, J.B., and S.C. REES, Mitochondria, Oxford Biology Readers, No. 19, Oxford University Press, Oxford, 1972.
2. NICHOLLS, P., Cytochromes and Biological Oxidation, Oxford Biology Readers, No. 66, Oxford University Press, Oxford, 1975.
3. HINKLE, P.C., and R.E. MCCARTY, How Cells Make ATP. Scientific American, Offprint No. 1383, March, 1978. The chemiosmotic theory applied to both oxidative phosphorylation and photophosphorylation.
4. CHAPPEL, J.B., ATP, Carolina Biology Readers, No. 50, Carolina Biological Supply Co., 1977.

CHAPTER 8 — الباب الثامن

PHOTOSYNTHESIS — البناء الضوئي



الباب الثامن
البناء الضوئي

يعتمد التنظيم والنشاط الوظيفي للخلية الحية على المدد الذي لاينقطع من الطاقة . وكما شاهدنا في الباب (٧) فأن مصدر هذه الطاقة هو الطاقة الحرة المختزنة في الجزيئات العضوية مثل الكربوهيدرات. الكائنات متباينة التغذية * heterotrophic organisms مثل الخميرة و مثلنا تحيا وتنمو بأخذ جزيئات عضوية في خلاياها. في الباب السابق درسنا كيفية عمل هذه الجزيئات كمصادر للطاقة الحرة في الخلايا .وكوحدات تركيبية لبناء الجزيئات الكبيرة في الخلية. من أين نحصل على هذه الجزيئات؟

المصدر الوحيد لجزيئات الوقود التي تعتمد عليه كل صور الحياة هو البناء الضوئي . النباتات الخضراء والطحالب تكون ذاتية التغذية أي أنها قادرة على حبس الطاقة الشمسية لتخليق جزيئات عضوية غنية بالطاقة من المواد غير العضوية الماء وثاني أكسيد الكربون. وفي النهاية فأن بقاء كل صور الحياة على الأرض مرهون بعملية البناء الضوئي . الشكل ٨-١ يعكس الحقيقة الأحيائية الأساسية: الكائنات متباينة التغذية تعتمد في بقائها على الكائنات ذاتية التغذية. فقد نتغذى على لحم البقر ولكن الثور تغذى على الأعشاب.

٨-١ . التجارب الأولى EARLY EXPERIMENTS

ربما كانت أولى التجارب المصممة لأستكشاف طبيعة البناء الضوئي هي تلك التي قام بها الطبيب الهولندي فان هيلمونت في عام ١٦٤٨ . و قبل ذلك بسنوات وضع فان

* أو غير ذاتية التغذية أو شاذة التغذية (المترجم)



الشكل ٨-١

هيلمونت ٢٠٠ رطل من التربة في إصيص كبير سبق تجفيفه تماما في الفرن. ثم بلل التربة بماء المطر و غرس به ساق صفصاف زنتة خمسة أرطال. بعد ذلك وضع الأصيص في التربة وغطى حافته بلوح من الحديد المثقب لكى تسمح الثقوب بوصول الماء والهواء الى التربة بينما تقلل من فرص دخول شوائب الى الأصيص من الخارج (الشكل ٨-٢). واستمر فان هيلمونت يروي نباته بماء المطر أو الماء المقطر لمدة خمس سنوات بعدها نزع النبات بعناية فوجد أنه قد أكتسب ١٦٤ رطلا و ثلاث أوقيات (لم يشمل هذا الوزن وزن الأوراق التي تساقطت خلال ٤ مواسم خريفية) ثم أعاد تجفيف التربة فوجد أن وزنها يقل بمقدار ٢ أوقية عن الوزن الأصلي وهو ٢٠٠ رطل. وقد إستنتج فان هيلمونت من هذه الحقائق التجريبية أن الزيادة في وزن الصفصاف جاءت من الماء وحده ولم يأخذ في إعتباره أن الغازات والهواء لها دخل بذلك.

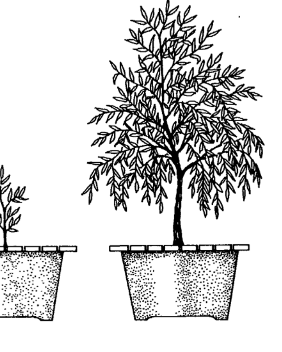
جاء أول دليل على مشاركة الغازات في البناء الضوئي من جوزيف بريستيلي في عام ١٧٧٢. فقد عرف أنه عندما توضع شمعة مشتعلة في حيز محكم الأغلاق فأنها لاتلبث أن تنطفىء وإذا وضع في غرفة مغلقة فأنه سرعان ما يختنق لأن عملية الأحتراق تستنفذ

كل الأوكسجين في الهواء وهو نفس الغاز الذي تعتمد عليه الحيوانات في التنفس. ومع ذلك فقد إكتشف بريستلي أنه عند وضع نبات في جو خال من الأوكسجين فأنه يعوض هذا الأوكسجين بحيث يمكن للفأر أن يحيا في هذا الخليط من الغازات. وقد ظن بريستلي ببساطة أن نمو النبات هو السبب في ذلك. ولكن الطبيب الهولندي إنجن - هوز هو الذي إكتشف في عام ١٧٧٨ أن التأثير الذي لاحظه بريستلي لا يحدث إلا إذا كان النبات مضاءاً. فالنبات الموجود في حيز مغلق في الظلام يستهلك أوكسجين تماما مثل الفأر أو الشمعة.

يصاحب نمو النباتات زيادة في محتواها من الكربون وقد إكتشف القس السويسري جين سينبير أن مصدر هذا الكربون هو ثاني أكسيد الكربون و أن إنطلاق الأوكسجين أثناء البناء الضوئي يصاحب أخذ ثاني أكسيد الكربون. وقد إستنتج سينبير (خطأ كما سنري في القسم ٨-٧) أن ثاني أكسيد الكربون يتحلل بحيث يدخل الكربون في تركيب المادة العضوية لجسم النبات بينما ينطلق الأوكسجين.

$$CO_2 + H_2O \rightarrow (CH_2O) + O_2$$

(القوسان حول (CH_2O) يعنيان عدم تحديد مركب معين وأنما النسبة بين الذرات في جزيء الكربوهيدرات مثل الجلوكوز $C_6H_{12}O_6$) وتوضح المعادلة كذلك أن النسبة



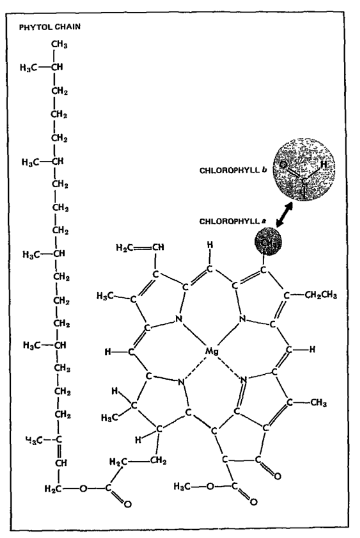
الشكل ٨-٢. تجربة فان هيلمونت. زاد وزن نبات الصفصاف بحوالي ١٦٤ رطل في مدة تزيد على خمس سنوات بينما لم يتغير وزن التربة تقريبا.

بين ثاني أكسيد الكـربون المستهلك والأوكسجين المنطلق هي ١:١ وهو الاكتشاف الذي تم التوصل إليه بعناية في السنوات التي تلت عمل سينبير. واذا أخذنا الجلوكوز كمثال للكربوهيدرات الناتج فإننا نستطيع كتابة معادلة البناء الضوئي على النحو الاتي:

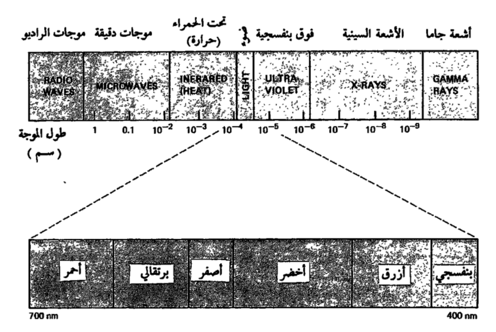
$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

٨-٢ . الأصباغ THE PIGMENTS

خلال تجاربة أوضع إنجن - هوز كذلك أن الأجزاء الخضراء فقط من النبات هي التي ينطلق منها الأوكسجين أثناء البناء الضوئي . أما الأجزاء غير الخضراء مثل السوق



الشكل ٨-٣. تركيب الكلوروفيل أ و الكلوروفيل ب . تجمعات مجموعة C = O- المتصلة بحلقة البورفيرين تجعل هذه المنطقة محبة للماء. سلسلة الفايتول شديدة الكراهية للماء. لاحظ الترتيب التبادلي للروابط المفردة والمزدوجة التي توجد حول حلقة البورفيرين (ملونة). الاليكترونات الاضافية للروابط المزدوجة ليست محدودة في المواقع المبينة ولكنها في الواقع حرة في الانتقال حول النظام. هذه الخاصية هي التي تجعل الجزيء يمتص طاقة الضوء بكفاءة.



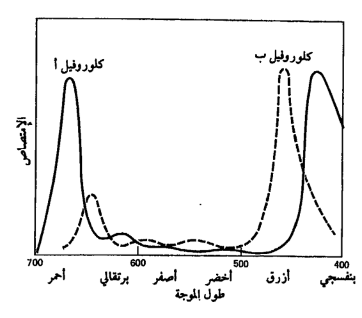
الشكـل ٨-٤ . طيف الاشعاع الكهرومغناطيسي. حوالي نصف الطاقة التي تصل الى سطح الأرض من الشمس تكون على هيئة ضوء أي أنها تقع في الجزء المرئي من الطيف والباقي في صورةً حرارة وكمية قليلة من الضوء فوق البنفسجي.

الخشبية والجـذور والأزهـار والثمار فأنها في الواقع تستهلك الأوكسجين فـي عمليـة التنفس . ونحن نعـرف الآن أن سبب ذلـك هو أن البنـاء الضـوئي يحـدث فقط في وجود الصبغة الخضراء المسماة بالكلوروفيل (أو اليخضور) Chlorophyll.

تركيب جزيء الكلوروفيل معـروف. فهـو يتكـون من بورفيرين يشبه في تركيبه بورفيرين الهيم الذي يكون المجموعة الفعالة في الهيموجلوبين والميوجلوبين وأنزيمات السيتوكروم. الاختلافات الرئيسية بين الكلوروفيل والهيم هي وجود: (١) ذرة مغنسيوم (بدل الحديد) في مركز حلقة البورفيرين -(٢) سلسلة جانبية هيدروكربونية طويلة هي سلسلة الفايتول phytol chain (الشكل ٨-٣).

يوجد في النباتات نوعان من الكلوروفيل هما كلوروفيل أ وكلوروفيل ب. والفرق الطفيف بين هذين النوعين من الكلوروفيل مبين في الشكل ٨-٣. في الخلية يكون كلوروفيل أ وكلوروفيل ب مرتبطين بالبروتين.

تعـد الكلوروفيلات أصباغ لأنها تمتص الضوء أي الأشعاع الكهرومغناطيسي في الطيف المرئي (الشكل ٨-٤). فالضوء الأبيض (مثل ضوء الشمس) يحتوي على كل



الشكل ٨-٥. طيـف الامـتـصـاص للكـلوروفـيـل أ والكلـوروفيـل ب.

ألوان الطيف المرئي من الأحمر الى البنفسجي ولكن الكلوروفيل لايمتص كل أطوال الموجة التي يتكون منها بنفس الدرجة. ومن الممكن تحديد درجة إمتصاص كل طول موجة (لون) بأضاءة محلول الكلوروفيل بضوء وحيد اللون وقياس كمية الضوء التي تمر في المحلول بمقياس ضوئي حساس. وبتكرار هذه العملية مع ضوء وحيد اللون حتى نغطى كل الوان الطيف المرئي يمكن رسم طيف إمتصاص ab-sorption spectrum (الشكل ٨-٥).

لاحظ أن الكلوروفيل أ والكلوروفيل ب يمتصان الضوء بأعلى قدر في منطقي اللون الأحمر واللون البنفسجي من الطيف بينما يكون إمتصاصهما للضوء الأخضر ضئيلا للغاية. وعلى ذلك فعندما يسطع الضوء الأبيض على التراكيب المحتوية على الكلوروفيل مثل الأوراق فأن الأشعة الخضراء تنعكس وتكون النتيجة أن تبدو هذه التراكيب خضراء.

تحتوي الخلايا النباتية الخضراء بالأضافة الى الكلوروفيل أ والكلوروفيل ب على عدة أنواع من أشباه الكاروتينات carotenoids. هذه الجزيئات هي أيضا أصباغ ذات الوان تتراوح بين الأحمر والأصفر ويكون أعلى إمتصاص للضوء بواسطتها في منطقة اللون الأزرق من الطيف وغالبا ماتكون أشباه الكاروتينات هي الأصباغ الغالبة في الأزهار والثمار. فاللون الأحمر للطماطم الناضجة واللون البرتقالي للجزر مرجعهما الى

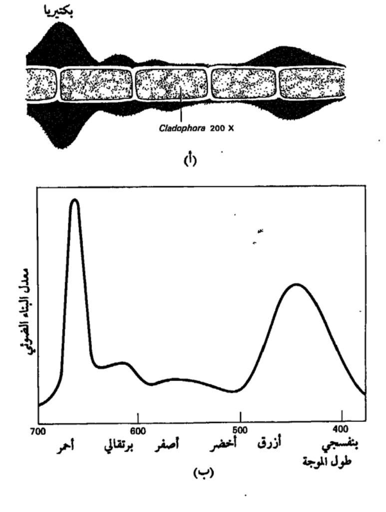
أشباه الكاروتينات. أما في الأوراق فأن زيادة كمية الكلوروفيل عادة تطغى على أشباه الكاروتينات فتخفى لونها. وفي الخريف حيث تتناقص كمية الكلوروفيل في الأوراق تظهر أشباه الكاروتينات ومن ثم تأخذ أوراق الخريف تلك الألوان الصفراء والحمراء اللامعة.

على الرغم من أن تركيب الكلوروفيل يبدو للوهلة الأولى مختلفا تماما عن تركيب أشبـاه الكاروتينات (الشكل ٨-٦) فأن النظر بدقة يوضح أنهما يشتركان في خاصية هامة. في كل حالة هناك ترتيب تبادلي لروابط تساهمية مفردة ومزدوجة. في الكلوروفيل يسرى هذا الترتيب حول حلقة البورفيرين أما في أشباه الكاروتينات فأنه يسرى على طول السلسلة الهيدروكربونية التي تربط الحلقات الطرفية. وبالرغم من أننا مضطرون لرسم الروابط المفردة والمزدوجة في مواضع ثابتة إلا أنه في الواقع تكون الأليكترونات الأضـافية المسئولـة عن الـروابط المزدوجة غير مثبتة بين أي أزواج محددة من ذرات الكربون وإنما تكون حرة في الأنتقال خلال كل أجزاء النظام. وهذه هي الخاصية التي تمكن هذه الجزيئات من إمتصاص الضوء المرئي بهذه القوة أي تعمل كأصباغ. وكما سنري لاحقا فأن هذه الخاصية هي التي تمكن هذه الجزيئات من إمتصاص طاقة الضوء الذي يسقط عليها بطريقة تجعلها موجهة إلى عملية البناء الضوئي.

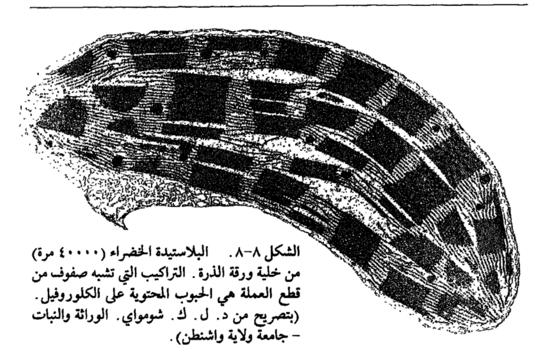
بينما نعرف أطوال الموجات التي تمتصها الكلوروفيلات وأشباة الكاروتينات بأعلى قدر فأنه لابد لنا أن نحدد أطوال الموجات الأكثر فاعلية في تنشيط البناء الضوئي. في عام ١٨٨١ قام العالم الألماني ت. و. إنجلمان بسلسلة تجارب لأكتشاف ذلك. فقد وضـع طحلب أخضر خيطي تحت المجهـر وأضـاءه بطيف رفيع وفي الوسط المحيط

الشكل ٨-٦. بيتاكاروتين - أحد أكثر أشباه الكاروتينات انتشارا. لاحظ التبادل بين الروابط المفـردة والمـزدوجـة التي تجعـل الجزيء يمتص الضوء بكفاءة. كثير من الحيوانات تستخدم البيتا كاروتين الذي تتناوله كمصدر لتخليق فيتامين أ.

بالخيوط وضع بكتريا هوائية متحركة. وبعد بضع دقائق من الإضاءة وجد أن البكتريا قد تجمعت وبلغت قمة نشاطها حول أجزاء الخيوط المضاءة بالضوء الأحمر والضوء الأزرق (الشكل ٨-٧). وعلى فرض أن البكتريا قد تجمعت عند مناطق تصاعد الأوكسجين فقد إستنتج إنجلمان أن الأشعة الحمراء والأشعة الزرقاء هي أكثر الألوان فاعلية بالنسبة للبناء الضوئي. وإذا رسمنا فاعلية كل لون من الوان الضوء في تنشيط البنـاء الضوئي نحصل على طيف النشاط action spectrum (راجع الشكل ٨-٧). التشـابـه بين طيف النشاط للبناء الضوئي وطيف الأمتصاص للكلوروفيل يرجح أن الكلوروفيلات هي أهم الأصباغ في هذه العملية. ومع ذلك فهذه الأطياف ليست متطابقة مما يرجح أن أشباه الكاروتينات تلعب دورا في البناء الضوئي ويبدو أنها تساعد في ملء فراغات الأمتصاص حتى يمكن إستغلال القدر الأكبر من طيف الشمس.



الشكل ٨-٧.
(أ) تجربـة إنـجلمان.
(ب) طيف النشاط في البناء الضوئي.



الشكل ٨-٨. البلاستيدة الخضراء (٤٠٠٠٠ مرة) من خلية ورقة الذرة. التراكيب التي تشبه صفوف من قطع العملة هي الحبوب المحتوية على الكلوروفيل. (بتصريح من د. ل. ك. شومواي. الوراثة والنبات - جامعة ولاية واشنطن).

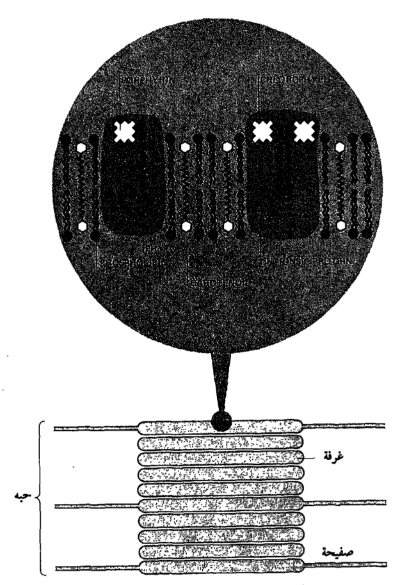
والطاقة التي تمتصها اشباه الكاروتينات تنتقل الى كلوروفيل أ حيث تستغل في البناء الضوئي ومن المحتمل أن يكون لكلوروفيل ب وظيفة مشابهة.

٨-٣. البلاستيدات الخضر CHLOROPLASTS

البلاستيدات الخضر الموجودة في خلايا النبات هي تراكيب مفلطحة يبلغ متوسط طولها حوالي ٧ ميكرون وعرضها ٣-٤ ميكرون (الشكل ٨-٨). يحيط بكل منها من الخارج زوج من الأغشية الملساء. تضـم هذه الأغشيـة وسطاً سائلاً يسمى الحشوة stroma ونظام معقد من الأغشية الداخلية. وتكون الأغشية الداخلية مطبقة مع بعضها في أزواج تسمى الصفائح lamellae وبصفة دورية تتضخم الصفائح فتكون مثانات مفلطحة محاطة بأغشيـة تسمـى ثايلاكويـدات * thylakoids وتترتب الثايلاكويدات في صفـوف كأنها قطع عملة متراصـة. تعـرف هذه الصفوف من الثايلاكويدات باسم الحبوب grana (الشكل ٨-٩).

الأغشية مثل الأغشية الأخرى في الخلية هي طبقات مزدوجة من الليبيد تحتوي على

* (أو أغشية أشباه الحجيرات)



الشكـل ٨-٩. أسفـل: تركيب إحـدي الحبـوب. أعـلى: التنـظيم المحتمل للصفائح. أشبـاه الكاروتينات والأجزاء الكـارهة للماء من جزيئـات الكلوروفيـل تبدو مدفـونـة في طبقة الليبيد المزدوجة.

كميات كبيرة من البروتينات الداخلية وهذه تشمل أنواعا من الأنزيمات من بينها إنزيمات السيتـوكـروم وإنـزيمات تخليق ATP. تحوى أغشية البـلاستيدات الخضر كذلـك كل الكلوروفيل وبعض أشباة الكاروتينات.

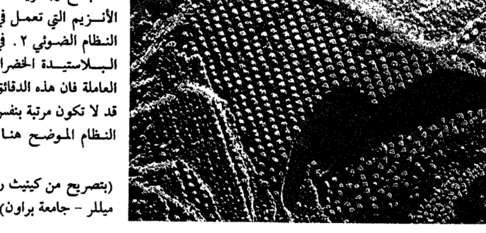
الـكـلـوروفـيـل جـزيء مـزدوج المـحـبـة للمـاء. فسلسـلة الـفـايتـول الهيـدروكربـونيـة شديـدة الكراهية للماء على حين يكون جزء من حلـقـة البورفيريـن (حيث توجد مجموعات C = O-) محبا للماء. وعلى فرض أن سلسلة الفايتول وجزء من مجموعة البورفيرين يكونان منغمسين في طبقة الليبيد المزدوجة فأن بقية حلقة البورفيرين

تكـون بارزة أعـلاهـا. أشبـاة الكاروتينات شديدة الكراهية للماء ويعتقد أنها غائرة بالكامل في طبقة الليبيد المزدوجة (الشكل ٨-٩).

الفحص المجهرى الألكتروني للأغشية الثايلاكويدية يبين وجود تجمعات كثيفة من الدقائق المنغمسة في طبقة الليبيد المزدوجة للأغشية (الشكل ٨-١٠) وتأتي هذه الدقائق في ثلاثة أحجام أكبرها تحوي الأنزيمـات المستخـدمـة فـي تخليـق ATP وهذه الدقائق في البـلاستيدات تكـافيء الأقراص الموجودة على الثنيات في الميتوكوندريا (أرجع الى الشكل ٧-١١) على الرغم من أنها تتجه نحو خارج الغشاء وليس نحو داخله كما في حالة الميتوكوندريا. أما النوعان الآخران من الدقائق فيحتمل أنهما يحتويان على الأصباغ والأنـزيمات المستعملة في إتمـام المـراحـل الضـوئية من البناء الضوئي أي ما يسمى بالتفاعلات الضوئية.

الحشوة في البلاستيدات الخضر غنية كذلك بالأنزيمات وبالأضافة الى ذلك فهي تحتوي على DNA والعديد من الريبوسومات. وهذه الريبوسومات تكون أصغر من تلك المـوجـودة فـي سيتوبـلازم الخليـة . ويفسر وجود DNA النشأة الذاتية للبلاستيدات الخضر فهي إما أن تنشأ من إنقسام بلاستيدة واحدة الى بلاستيدتين أو عن طريق ظهور جسيمات ضئيلة عديمـة اللـون تسمـى البلاستيـدات الأوليـة proplastids . الضوء ضروري لتحول البلاستيدات الأولية الى بلاستيدات خضر وهذا يفسر اللون الباهت

الشكـل ٨-١٠. صورة بالمجهر الأليكتروني للسطح الداخلي لغشاء ثايلاكويدي (١٢٠٠٠٠ مرة)



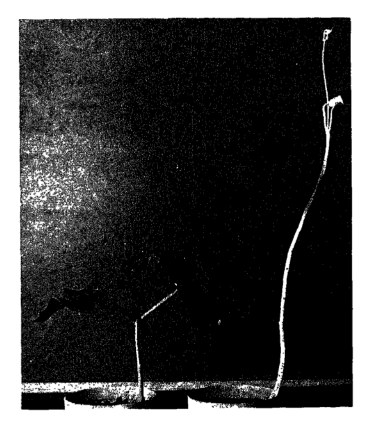
كل واحـدة من الدقائق قد تمثل مركب معقد من الأصبـاغ وجـزيئـات الأنـزيم التي تعمـل في النـظام الضـوئي ٢. في البـلاستيـدة الخضراء العاملة فان هذه الدقائق قد لا تكون مرتبة بنفس النـظام المـوضح هنـا.

(بتصريح من كينيث ر. ميللر - جامعة براون).

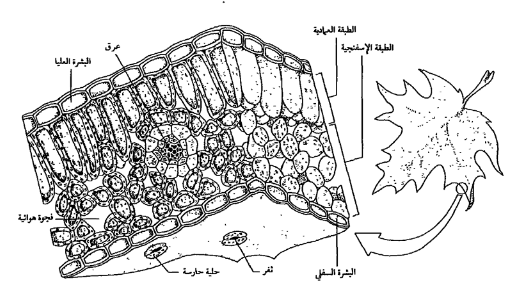
للبـادرات النـامية في الـظلام (الشكـل ٨-١١). وللبلاستيدات الأولية القدرة على مضاعفة نفسها وفي الحقيقة فأن هذا هو السبيل الوحيد الذي تنشأ منه بلاستيدات أولية جديدة فأنـوية الخـلايا النباتية لاتستطيع تصنيعهم. وعلى ذلك فكلما قامت الخلايا الخضر بالأنقسـام غير المبـاشر فأنه من الضروري أن تتلقى كل واحدة من الخليتين البنويتين بلاستيدات أولية في السيتوبلازم الى جانب ما تتلقاه من كروموسومات النواه.

٨-٤. الورقة THE LEAF

في النبـاتـات الـراقية تكون البلاستيدات الخضر بصفة عامة محصورة في السوق الحديثة والثمار غير الناضجة والأوراق. والأوراق هي المصانع الحقيقية للبناء الضوئي في النبات. القطاع العرضي في نصل ورقة نموذجية يكشف وجود عدة طبقات نسيجية متميزة (الشكل ٨-١٢). السطح العلوي للورقة تغطية طبقة واحدة من الخلايا هي البشرة العليا upper epidermis و هذه الخلايا تحوى القليل من البلاستيدات الخضر أو تكون خالية منها تماما وهي لذلك شفافة وتسمح بمرور معظم الضوء الساقط عليها الى



الشكـل ٨-١١. بادرة الفول النامية في الضوء (الى اليسـار) وفي الـظلام (الى اليمـين). اللون الشـاحب للنبات النامي في الظلام نشأ عن نقص الـكـلوروفيـل وعنـدمـا تنفد المواد الغذائية المختـزنـة في البـذرة تموت البادرة. كل بادرة فيها ثلاث عقـد ولكن السلاميـات في النبـات النـامي في الـظلام تسـتـطيـل وهـو مايسمى الإصفرار etiolation.



الشكل ٨-١٢. تركيب ورقة نموذجية كما يرى في المقطع العرضي. تقوم خلايا الطبقة العمادية بمعظم البناء الضوئي في الورقة. في بعض الأوراق وخاصة تلك المعرضة لسطوع الشمس قد توجد طبقة أو طبقتان من الخلايا العمادية.

الخلايا الداخلية كما أنها تفرز مادة شمعية شفافة تسمى الكيوتين cutin هذه المادة تكون طبقة الأدمة cuticle وهي بمثابة حاجز في وجة الرطوبة فتقلل فقد الماء من الورقة.

يوجد تحت خلايا البشرة العليا صف أو صفان من خلايا تشكل الطبقة العمادية palisade layer. وهـذه الخلايا أسطوانية الشكل وتتجة بحيث يكون محورها الطولى عمودي على مستوي الورقة وكل منها ممتلئة بالبلاستيدات الخضر وكما يتبادر الى الذ هن فأن هذه الخلايا تقوم بمعظم البناء الضوئي في الورقة. وشكل هذه الخلايا ملائم تماما لهذه الوظيفة فهي مرتبة بحيث يتعرض أكبر عدد منها لأشعة الشمس. وبالأضافة الى ذلك فأن طولها يزيد من فرصة إمتصاص البلاستيدات الخضر للضوء الداخل الى الخلية.

تحت الطبقة العمادية توجد الطبقة الأسفنجية spongy layer. وخلايا الطبقة الأسفنجية غير منتظمة الشكل وغير متزاحمة. وعلى الرغم من وجود قلة من البلاستيدات الخضر بها فأنه يبدو أن وظيفتها الأساسية هي الأختزان المؤقت لجزيئات الغذاء التي أنتجتها خلايا الطبقة العمادية كما أنها تساعد في تبادل الغازات بين الورقة والجو الخارجي. أثناء ساعات النهار تفرز هذه الخلايا أوكسجين وبخار ماء في الفراغات الهوائية المحيطة بها كما تلتقط ثاني أكسيد الكربون من الهواء الموجود في هذه

الفراغات الهوائية . هذه الفراغات الهوائية متصلة ببعضها البعض وفي النهاية تفتح على الخـارج بواسطـة فتحـات خاصـة تسمى الثغور stomata (مفردها ثغر stoma)

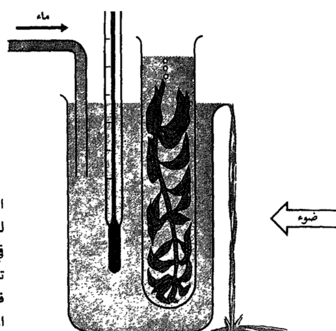
في معظم النباتات توجـد الثغور بصفة أساسية في البشرة السفلي lower epidermis للورقة . أنجن – هوز نفسه بيَّن لأول مرة أن الأوراق التي تقوم بالبناء الضوئي يتصاعد منها الأوكسجين بسرعة أكبر عند السطح السفلي عنه عند السطح العلوي . وجود حوالى ١٠٠٠٠٠ ثغر في السنتيمتر المربع الواحد من السطح السفلي لأوراق البلوط وغيابها تماما في السطح العلوي يفسر ذلك بسهولة .

معـظم خلايا البشرة السفـلي تشبه خلايا البشرة العليا. ومع ذلك توجد خليتان كلويتا الشكـل حـول كل ثغـر تسميان الخليتان الحارستان guard cells. ولا تختلف الخـلايا الحارسة عن بقية خلايا البشرة السفلي في الشكل فقط وأنها في إحتوائها على أعداد كبيرة من البلاستيدات الخضر كذلك. وتنظم الخلايا الحارسة فتح وغلق الثغور وبذلك يكون لها قدر كبير من التحكم في تبادل الغازات بين الورقة والجو المحيط بها .

٨–٥ . العوامل المحددة لمعدل البناء الضوئي

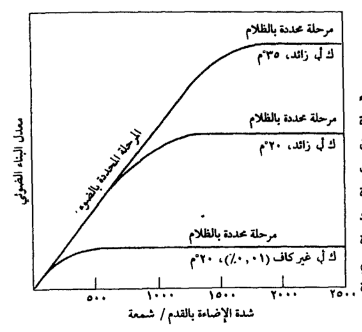
FACTORS LIMITING THE RATE OF PHOTOSYNTHESIS

معادلـــة البنـاء الضوئـي $6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ تبين العلاقـة بيـن المواد الـداخلة في العملية والمـواد النـاتجة منها ولكنها لاتقول لنا شيئا عن الخطوات الـوسيطة للعملية . وقد تبين من تجارب العالم البريطاني ف . ف . بلاكمان أن البناء الضوئي يشتمل على عمليتين متميزتين تماما ويمكن تكرار نفس نتائجه التجريبية من خلال الجهاز المبين في الشكل ٨–١٣ . النبات المائي الأخضر إلوديا *Elodea* (موجود في محلات بيع لوازم الأحواض المائية) هو الكائن الأختباري . حينما يوضع فرع رأسا على عقب في محلول مخفف من بيكـربـونات الصوديوم (التي تعمل كمصدر لثاني أكسيد الكربون) ويضاء بلمبة كشاف فأن فقاعات الأوكسجين لاتلبث أن تتصاعد من الجزء المقطوع من الساق . ثم يمكن للمرء أن يعد عدد الفقاعات المتصاعدة في فترة زمنية محددة بأستعمال درجات متفاوتة من شدة الأضاءة وبرسم هذه المعلومات بيانيا ينبغي أن نحصل على رسم كالمبين في الشكل ٨–١٤ .



الشكل ٨-١٣. جهاز لتحديد معدل البناء الضوئي في الالوديا وهو نبات مائي. تؤخذ القياسات بعدد فقاعات الأوكسجين المتصاعدة من الساق.

حيث أن معدل البناء الضوئي لايستمر في الزيادة بزيادة شدة الضوء إلى مالانهاية فقد إستنتج بلاكمان أن هناك على الأقل عمليتان متميزتان: الأولى هي تفاعل يلزمه ضوء و الثانية تفاعل لايلزمه ضوء. وهذا الأخير يسمى تفاعل ظلام على الرغم من أنه يمكن أن يتم في وجود الضوء. وضع بلاكمان نظريته التي مؤادها أنه عند شدة الأضاءة المعتدلة فأن تفاعل الضوء يحدد أو ينظم إيقاع العملية كلها. وبعبارة أخرى عند شدة الأضاءة المعتدلة فأن تفاعل الظلام يمكنه التعامل مع كل المواد الوسيطة الناتجة من تفاعل الضوء. ومع زيادة شدة الضوء فأنه لابد من الوصول الى نقطة يعمل تفاعل الظلام عندها بأقصى طاقتة وأي مزيد من الأضاءة لن يكون له تأثير وتصل العملية الى معدل ثابت. وتكتسب هذه النظرية مزيدا من القوة مع إعادة التجربة عند درجة حرارة أعلى قليلا. فكما ذكرنا سابقا فأن معظم التفاعلات الكيميائية تتم بصورة أسرع مع زيادة درجات الحرارة (الى نقطة معينة). عند درجة ٣٥°م لايثبت معدل البناء الضوئي إلا إذا زيدت شدة الأضاءة وهذا يرجح أن تفاعل الظلام يعمل الأن بصورة أسرع. وعند شدة الأضاءة المنخفضة لايكون معدل البناء الضوئي عند درجة ٣٥°م أعلى منه عند درجة ٢٠°م وهذا يؤيد الفكرة أن التفاعل الضوئي هو المحدد للعملية عند شدة الأضاءة هذه. التفاعل الضوئي لايعتمد على درجة الحرارة ولكنه ببساطة يعتمد على شدة الأضاءة.

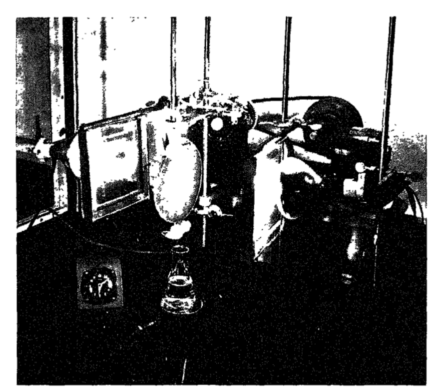


الشكل ٨-١٤. معدل البناء الضوئي كدالة لشدة الإضاءة وتركيز ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة، عند الدرجات المنخفضة من شدة الاضاءة يكون الضوء هو العامل المحدد وعند الدرجات العالية من شدة الاضاءة تكون تركيزات ثاني أكسيد الكربون ودرجات الحرارة هي العوامل المحددة.

لاتحدث الزيادة في معدل البناء الضوئي بزيادة درجة الحرارة إذا كان إمداد ثاني أكسيد الكربون محدودا. وكما هو مبين في الشكل ٨-١٤ يصل المعدل العام للبناء الضوئي إلى قيمة ثابتة عند شدة أضاءة منخفضة إذا كانت كمية ثاني أكسيد الكربون محدودة. وعلى ذلك لابد أن يضاف تركيز ثاني أكسيد الكربون كعامل ثالث محدد لمعدل حدوث البناء الضوئي. ومن الناحية العملية فأن تركيز ثاني أكسيد الكربون المتاح للنباتات الأرضية هو ببساطة ذلك الموجود في الجو أي ٠,٠٣٪

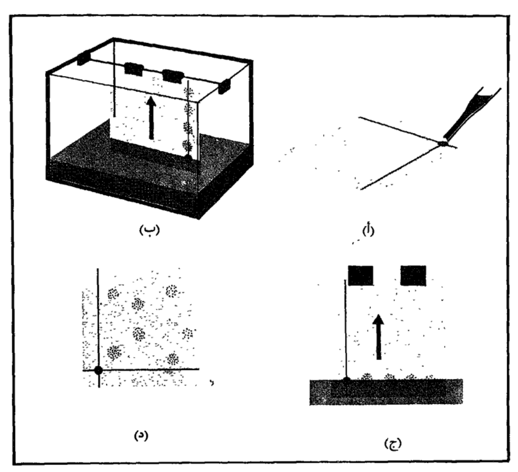
٨-٦. تفاعلات الظلام THE DARK REACTIONS

كما تتوقع فأن تفاعل الظلام في البناء الضوئي هو في الحقيقة سلسلة من التفاعلات. تتضمن هذه التفاعلات أخذ النبات لثاني أكسيد الكربون واختزال ثاني أكسيد الكربون بواسطة ذرات الهيدروجين. وقد أمضى دكتور كالفين ومعاونوه من جامعة كاليفورنيا سنوات حتى توصلوا الى تتابع التفاعلات الكيميائية التي يشملها البناء الضوئى. وقد كان الأسلوب التجريبي الأساسي لديهم هو تعريض معلقات من طحالب خضر وحيدة الخلية للضوء ولثاني أكسيد الكربون مشع (C^{14}) (الشكل ٨ - ١٥) . إستخدام الكربون المشع (C^{14}) في ثاني أكسيد الكربون يعلِّم الذرة ويسمح بدراسة تحولاتها الكيميائية.



الشكل ٨-١٥ . الجهاز المستخدم في تتبع مصير ثاني أكسيد الكربون المشع في تفاعلات الظلام. يوضع المعلق الطحلبي في الوعاء الذي يصل اليه ثاني أكسيد الكربون المشع ثم يضاء. توقف تفاعلات الظلام بافراغ محتويات الوعاء في مخبار يحتوي على الكحول الساخن (بتصريح من د. جيمس أ. باشام).

بعد فترات متباينة من الأضاءة يوقف نشاط المعلق الطحلبي وتستخلص محتويات خلاياه ثم يتم فصلها بواسطة عملية تسمى الفصل اللوني الورقي (أو كروماتوجرافي الورق paper chromatography). توضع قطرة من مستخلص الخلايا على طول إحدى حواف مربع من ورق التجفيف ثم تغمس الورقة في مذيب. يرتفع المذيب في اللوحة الورقية بسبب التجاذب الشعري capillary attraction (الشكل ٨-١٦) و يحمل في طريقه المواد الموجودة في قطرة المستخلص الخلوي بمعدلات مختلفة. وبصفة عامة فأن كل مركب ينفرد بمعدل خاص ينتقل به مع مذيب معين. وعندما تكتمل العملية تكون المواد المختلفة قد إنفصلت إلى مسافات محددة على لوحة الورق لتكون ما يسمى كروماتوجرام chromatogram. ويمكن التعرف على كل مادة بمقارنة موقعها بمواقع مواد معروفة تحت نفس الظروف أو يمكن قطع الجزء الخاص بالمادة من اللوحة الورقية



الشكل ٨-١٦. فصل مكونات مخلوط بواسطة الفصل اللوني الورقي ذو الاتجاهين. (أ) و (ب) عندما توضع قطرة في مذيب مناسب عند الركن الأيمن الأسفل للورقة فان المواد في هذه القطرة تنفصل جزئيا كلما تحركت لأعلى. (ج)، (د) يمكن التوصل الى المزيد من الفصل بلف الورقة بمقدار ٩٠ واستعمال مذيب مختلف.

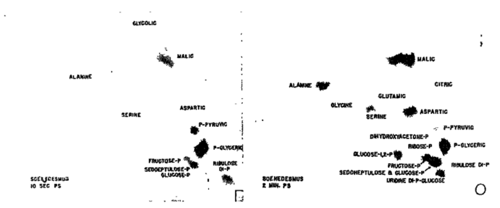
ثم إجراء إختبارات تحليلية دقيقية على الكمية القليلة الموجودة به من المادة.

ولتحديد أي المواد المفصولة على الكروماتوجرام هي المشعة توضع لوحة من فيلم حساس للأشعة السينية على الكروماتوجرام فأذا ظهرت بقع داكنة على الفيلم (بسبب الأشعاع الصادر عن ذرات C^{14}) يمكن الربط بين مواقعها ومواقع بقية المواد الكيميائية على الكروماتوجرام. وبأستخدام هذه الطريقة المسماة التصوير الأشعاعي الذاتي autoradiography وجد كالفن أن (C^{14}) قد ظهر في جزيئات الجلوكوز بعد ٣٠ ثانية من بدء البناء الضوئي وعندما سمح بخمس ثوان فقط إكتشف وجود الأشعاع في عدة جزيئات أخرى صغيرة (الشكل ٨-١٧). وبالتدريج أمكن تحديد مسار عملية

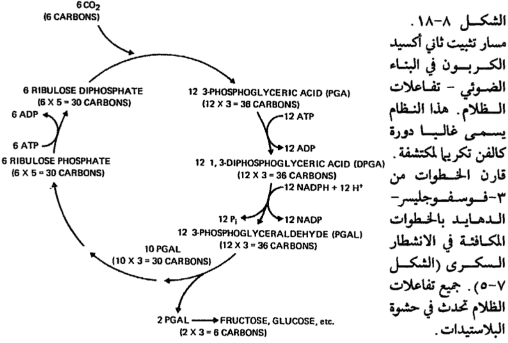
تثبيت الكربون .

واحد من أهم المركبات في هذه العملية هو سكر خماسي الكربون ومفسفر يسمى فوسفـات الـريبيولـوز ribulose phosphate. وعند إضافة مجموعة فوسفات ثانية الى الجزيء بواسطة ATP فأن المركب الناتج (ثنائي فوسفات ريبيولوز) يمكن أن يتحد مع CO_2. جزيء السكر ثلاثي الكربون الناتج ينكسر بعد ذلك ليكون جزيئين من حامض ٣-فـوسفـوجليسريك (الشكـل ٨-١٨). ويتلقى كل من هذين الجـزيئين مجموعة فوسفـات ثانية (من جزيء ATP) لتكـوين جزيئـين من حامض ١,٣-ثنـائي فوسفوجليسريك 1,3-diphosphoglyceric acid (DPGA) ثم يختـزل كل منهمـا الـى ٣- فوسفـوجليسرالـدهيـد 3- phosphoglyceraldehyde (PGAL) وتفقـد مجمـوعة فوسفات في أثناء ذلك والعامل المختزل هو الصورة المختزلة من المرافق الأنزيمي coenzyme NADP وهذا الأخير يشبة تماما NAD إلا أن به مجموعة فوسفات ثالثة (الشكل ٧-٤) ومثل NAD يمكن ان يختزل عن طريق إكتساب إثنين من الأليكترونات وسوف نرمز للصورة المختزلة بالرمز NADPH لأن بروتون واحد يصاحب عملية الأختزال (أيضا كما في حالة NAD) وعند الأشارة الى الصورة المتأكسدة فسوف نرمز لها بالرمز NADP.

إذا نظرت مرة أخرى إلى الشكل ٧-٥ في الباب السابق فسوف تكتشف حقيقة غريبة



الشكـل ٨-١٧ . صورة اشعاع ذاتي تبين المواد المشعة الناتجة بعد ١٠ ثوان (إلى اليسار) وبعد دقيقتين (الى اليمين) من البناء الضوئى باستعمال ثاني أكسيد كربون مشع . عند ١٠ ثوان يوجد معظم النشاط الاشعاعي في حامض ٣-فوسفوجليسريك (p-glyceric) (عند دقيقتين ثم تخليق سكرات سداسيـة الكربون مشع (جلوكوز وفركتوز) وكذلك بعض الأحماض الأمينية . المستطيل الصغير والدائرة (في الأركان اليمني السفلية) تحدد مكان وضع مستخلصات الخلايا (بتصريح من ذ. جيمس أ. باشام).



الشكــل ٨-١٨. مسار تثبيت ثاني أكسيد الكــربــون في البنـاء الضـوئي - تفـاعلات الـظلام. هذا النـظام يسـمـى غالبـا دورة كالفن تكريما لمكتشفة. قارن الخــطوات من ٣-فـوسفـوجليسر-الـدهـايـد بالخـطوات المكـافئـة في الانشطار السـكــرى (الشكــل ٥-٧). جميع تفاعلات الظلام تحدث في حشوة البلاستيدات.

عن تفاعلات الظلام في البناء الضوئي. فمن حامض ٣-فوسفوجليسريك وحتى PGAL تكون الخطوات تماما عكس ما يحدث في عملية إنشطار السكر أو الجلكزة glycolysis. ففي إنشطار السكر يتأكسد كل جزىء من PGAL إلى DPGA بواسطة NADP ويتم تخليق جزىء ATP وينتـج حامض ٣- فوسفوجليسريك. أما في البناء الضوئي فأن كل جزىء من DPGA يختزل بواسـطة NADPH ونحتـاج الى جزىء ATP وينتج PGAL. (الشكل ٨-١٨). فأذا بدأنا بست جزيئات من فوسفات الريبولوز فأننا نحصل على ١٢ جزىء من PGAL منهم عشرة تستغل لأعادة تكوين الجزيئات الست من فوسفات الريبولوز التي تبدأ العملية. أما الجزيئان الباقيان من PGAL فيدخلان في مســار إنشطار السكر لتكوين جزىء جلوكوز واحد في النهاية. وبذلك تكون ست ذرات كربون من ثاني أكسيد الكربون قد أستغلت في تكوين جزىء واحد من الجلوكوز سداسي الكربون. (على الرغم من أن ذرات الكربون الست لم تدخل الى نفس جزىء الجلوكـوز). أما الفركتوز فهو مركب وسيط في هذا المسار كما كان في عملية إنشطار السكر. ويمكن إتحاد جزىء جلوكوز مع جزىء فركتوز لتكوين السكر الثنائي سكروز الذي يمكن نقله الى أجزاء أخرى من جسم النبات. والجلوكوز الناتج من عملية البناء الضـوئي يمكن إستعـماله أيضا في تخليق النشا والسيليلوز وفي النهاية كل الجزيئات الأخرى (مثل الليبيدات والبروتينات والأحماض النووية) في الخلية.

ما الـذي يجعـل النبـاتات الخضراء دون الحيوانات قادرة على تحويل ثاني أكسيد الكـربـون الى جلوكـوز؟ عديد من خطوات تفـاعلات الظلام ليست مقصورة على النبـاتـات وحـدها. وفي الواقع فأن بعض الخلايا الحيوانية يمكنها أخذ ثاني أكسيد الكربون وضمه الى جزيئات عضوية إذا توفرت لها كمية كافيـة من ATP وكل ماهو مطلـوب لذلك هو وفـرة من النشـاط الأختزالي (NADPH) و ATP. ولكن الخلايا متباينة التغذية تحصل على هـذا النشاط الاختزالي وعلى ATP من هدم جزيئات عضوية مثل السكرات. وفي أحسن الأحوال تبلغ كفاءة العملية حوالي ٤٠٪ فقط. ولذلك لايمكن للخلايا متباينة التغذية أن يتراكم بها الجلوكوز بهذه الطريقة. والسر في التغذية الذاتية يكمن في تفاعلات الضوء.

٨-٧. تفاعلات الضوء THE LIGHT REACTIONS

كان عالم الأحيــاء الدقيقة الأمريكي فان نيل هو أول من المح الى أن الضوء يلعب دورا في البناء الضوئي. وقد توصل الى نظريته من خلال دراسة البناء الضوئي في بكتريا الكبريت القرمزية. هذه البكتريا تنتج الجلوكوز من ثاني أكسيد الكربون مثلما تفعل النبـاتات الخضراء وهي تحتاج الى الضوء لأتمام هذا التخليق ولكن المـاء لايستعمل كمـادة بادئـة. تستعيـض هذه البكتـريا عنه بكبـريتيـد الهيدروجيـن (H_2S) كما أن الأوكسجـين لايتصـاعد أثناء البناء الضوئي ولكن الكبريت هو الذي ينتج من هذه العملية. وعلى ذلك ففي سلسلة تفاعلات الظلام تستعمل ذرات الهيدروجين لأختزال ثاني أكسيد الكربون الى مواد كربوهيدراتية

$$CO_2 + 2H_2S \rightarrow (CH_2O) + H_2O + 2S$$

وقد رأي فان نيل في هذه التفاعلات ما يوازي عمليــة البناء الضوئي في النباتات الخضراء. وأستنتـج أنه في النباتات الخضراء تتسبب طاقة الضوء في تكسير الماء الى هيدروجين وأوكسجين ثم تستغل ذرات الهيدروجين في إختزال ثاني أكسيد الكربون من خلال سلسلة من تفاعلات الظلام

$$CO_2 + 2H_2O \rightarrow (CH_2O) + H_2O + O_2$$

فاذا كانت هذه النظرية صحيحة فإنه يترتب على ذلك أن كل الأوكسجين الناتج من البنـاء الضوئي يكون مصدرة الماء تماما كما أن مصدر كل الكبريت الناتج من البناء

الضـوئي في البكتريا مصدره كبريتيـد الهيدروجين. هذا الأستنتاج يتعارض تماما مع نظرية سينبـير (راجـع الجزء ٨-١) التي مؤداها أن الأوكسجين المتصاعد أثناء البناء الضوئي مصدره ثاني أكسيد الكربون. اذا كانت معادلة البناء الضوئي في الجزء ٨-١ صحيحـة فأن بعض الأوكسجـين المتصاعد على الأقل لابد أن يأتي من ثاني أكسيد الكربون أما اذا كانت نظرية فان نيل سليمة فأنه لابد من إعادة كتابة معادلة البناء الضوئي لتصبح

$$6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

حينـما يواجـه المـرء بمثـل هذه النـظريات المتعـارضـة فأنه يحاول تصميم تجربة لأختبـارهـا. ويمكن للمرء التنبؤ بما يحتمل أن تسفر عنه التجربة إذا كانت النظرية صحيحة. في هذه الحالة كان لابد لهذه التجربة الحاسمة أن تنتظر نمو الأبحاث الذرية التي مكنت من إنتاج نظائر غير تلك الموجودة في الطبيعية أو بتركيزات أعلى من الموجود في الطبيعة. في الهواء والماء والمواد الطبيعية الأخرى التي تحتوي على الأوكسجين يكون ٩٩,٧٦٪ مـن ذرات الأوكسجيـن من O^{16} .و ٠,٢٪ فقط من نظيره الأثقل O^{18} في عام ١٩٤١ تمكن صمويل روبين ومساعدوه من جامعة كاليفورنيا من تحضير ماء خاص فيه ٠,٨٥٪ من الجزيئات تحتوي علـى O^{18} (الشكل ٨-١٩). وعند إمداد معلق طحلبي يقوم بالبناء الضوئي بهـذا الماء كان جزء الأوكسجين O^{18} المتصاعد هو ٠,٨٥٪ وهي نفس نسبته في الماء المقدم للطحلب وليست ٠,٢٪ الموجودة فـي كل العينات الطبيعية مـن الأوكسجيـن (و مركبـات مثـل CO_2)

بيّنت هذه النتائج بوضوح أن تفسير سينبير كان خاطئا. فأذا كان كل الأوكسجين المتصـاعد أثناء البناء الضوئي مصدره ثاني أكسيد الكربون فقد كنا نتوقع أن يحتوي الأوكسجين المتصاعد في تجربـة روبيـن على النسبـة ٠,٢٪ فقط من O^{18} الموجودة في الـطبيعـة أما إذا كان كل من ثاني أكسيد الكربون والماء يسهم في كمية الأوكسجين المتصاعد فقد كنا نتوقع أن تكون نسبة النظائر الى بعضها البعض متوسطة ولكن في الواقع جاءت نسبة النظائر في الأوكسجين المتصاعد هي نفس نسبة وجودهم في الماء المستعمل (الشكل ٨-١٩).

قام روبين وزملاؤه أيضا بتحضير مصدر لثاني أكسيد الكربون الغني بذرات O^{18}

وحينـما قامت الـطحالب بالبناء الضوئي مستخدمة هذا الغاز والماء الطبيعي لم يكن الأوكسجـين المتصـاعد غنيا بذرات O^{18} فقد إحتوي فقط على نسبة ٢ . ر٪ من هذه الذرات وهي النسبة الموجودة في الماء المستعمل. ويفترض أن الذرات الثقيلة قد دخلت في الناتجين الآخرين وهما المادة الكربوهيدراتية والماء.

دعمت هذه النتائج فكرة فان نيل التي مؤداها أن إحدى وظائف الضوء في البناء الضوئي هي فصل الأوكسجين عن الهيدروجين في جزيئات الماء ولكن بقيت المشكلة الخاصة بكيفية إتاحة ذرات الهيدروجين لتفاعلات الظلام.

لقد رأينا أن تفاعلات الظلام في البناء الضوئي تتطلب كميات وفيرة من NADP المخـتـزلـة (NADPH) و ATP. وقد أشارت دراسات فان نيل وروبين الى أن الماء يعمل كمصدر للأليكترونات اللازمة لأختزال NADP الى NADPH. في عام ١٩٥١ تأكدت صحة هذا الأفتراض عندما تمكنت عدة مختبرات من إثبات أنه عندما تضاء بلاستيدات خضر معزولة فأنها تختزل NADP الى NADPH مع تصاعد كميات مكافئة من عنصر الأوكسجين.

$$2H_2O + 2NADP^+ \xrightarrow{\text{الضوء}} 2\ NDPH + O_2 + 2H$$

الشكـل ٨-١٩. نتـائج روبين. في كل تجربة كانت النسبة المئوية لذرات O_2 الموجودة في الأوكسجين المتصاعد أثناء البناء الضوئي هي نفس نسبتهم في الماء المستعمل. التبادل غير الحيوي لذرات الأوكسجين بين الماء وأيونات البيكربونات المستعملة كمصدر لثاني أكسيد الكربون يفسر إتخاذ النظير في ثاني أكسيد الكربون في التجربة الأولى (*).

التجربة		النسبة المئوية لذرات O^{18} في الماء	ثاني أكسيد الكربون	الأوكسجين
١	بداية	٠,٨٥	٠,٢٠	–
	نهاية	٠,٨٥	*٠,٦١	٠,٨٦
٢	بداية	٠,٢٠	٠,٦٨	–
	نهاية	٠,٢٠	٠,٥٧	٠,٢٠

ولكن هذا التفـاعـل ريدوكس غير مرغـوب. فالأليكـترونـات تنتقـل من ذرات الأوكسجـين ذات السـالبيـة الكهـربيـة العـاليـة الى جزيئات NADP ذات السالبية الكهربية الضعيفة. وكما يتبين من الشكل ٨-٢٠ فأن الأليكترونات تنتقل من جهد ريدوكس مقدارة + ٠,٨٢ فولت الى جهد ريدوكس مقدارة - ٠,٣٢٤ فولت وبذلك تنتقل هذه الأليكترونات ضد فارق مقدارة ١,١٤ فولت. ما هو ذلك العامل المؤكسد القوي بما يكفي لنزع الأليكترونات من ذرات الأوكسجين ضد هذا الفارق الكبير؟

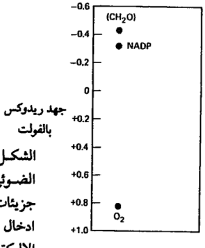
الأجـابـة هي : الكلوروفيل نفسـه. ولكي نفهم كيف يصير الكلوروفيل عامل ريدوكس قوي لابد لنا أن نناقش تأثير الضوء على الكلوروفيل.

تأثير الضوء على الكلوروفيل THE EFFECT OF LIGHT ON CHLOROPHYLL

حينما يوضع محلول الكلوروفيل في طريق شعاع من الضوء الأبيض ينبعث منه ضوء أحمر قاني. هذه الظاهرة تسمى التألق flourescence ويمكن إيضاحها بسهولة حيث يمكن تحضير الكلوروفيل الخام بنقع أوراق النجيل في الأيثانول ويتألق المحلول تحت شعاع أبيض.

وتفسـير ظاهرة التألق هو أن طاقة الضوء الممتص تنتقل الى إليكترون في جزيء الكلوروفيل فترفعه الى مستوى أعلى من مستويات الطاقة وقد لاحظنا في بداية هذا الباب سهولة هجرة الأليكترونات بحرية حول الجزيء. وهذه هي الإليكترونات التي ترتفع بسهولة الى مستويات أعلى للطاقة عند إمتصاص الجزيء للضوء. وطالما شغل الأليكترون مستوي عالي للطاقة فان جزيء الكلوروفيل يوصف بأنه متهيج excited في محلول الكلوروفيل. تظل حالة التهيج لحظة بسيطة بعدها يعود الأليكترون الى مستوي الطاقة السابق ويتخلى عن الطاقة التي رفعته في البداية. وتنطلق هذه الطاقة على هيئة ضوء أحمر له طول موجة بالغ التحديد.

عند إضاءة أوراق كاملة بالضوء الأبيض يلاحظ قليل من التألق أولا يلاحظ عليها أي تألق بالمرة. وأحد التفسيرات المحتملة لذلك هو أن شيئا ما قد أزاح الأليكترون عالي الطاقة من جزيء الكلوروفيل المتهيج قبل أن يهبط ولكن إذا كان ذلك صحيحا فأنه ينبغي أن يكون جزيء الكلوروفيل الآن موجب الشحنة. وفي الحقيقة لدينا الآن دليل قوي على أنه عند إضاءة البلاستيدات الخضر فأن جزيئات كلوروفيل معينة تتأكسد أي تكتسب شحنة موجبة.



الشكـل ٨-٢٠. جهـد الاختـزال والأكسدة في البناء الضـوئي. ضخ اليكـترونـات من ذرات الأوكسجين في جزيئات الماء الى NADP يتطلب ١٤ر١ فولت وذلك يكافيء ادخال ٥٢ر٦ كيلو سعر من الطاقة لكل زوج من الاليكترونات.

بالأضافة الى ذلك فأن التألق الذي يمكن رؤيته في النظام الكامل هو لون أحمر مميز للكلوروفيل أ. وعـلى الـرغم من أن المحـاليل المضـاءة من كلوروفيل ب وأشبـاه الكـاروتينـات لها تألق مميز فأن أطـوال موجاتها لاتـرى عند إضاءة أوراق كاملة أو بلاستيدات خضر. كما أن التألق الذي يشاهد لاتنتجه معظم جزيئات كلوروفيل أ حيث يتغـير طيف الإمتصاص للكلوروفيل أ بتغير عوامل منها طبيعة البروتين الذي يكون معه مركب معقد وموقعه داخل أغشية البلاستيدة الخضراء. وعلى أي حال فقد وجدت عدة أنواع من الكلوروفيل أ في البلاستيدات الخضر تختلف عن بعضها قليلا في طول موجة الضوء الذي تمتصه بكفاءة منها نوعان فقط يتألقان. وقد أعطيا الرمزين P700, P680 تبعا لطول الموجة (٦٨٠ نانومتر و ٧٠٠ نانومترعلى الترتيب) الذي يمتصه كل منهما.

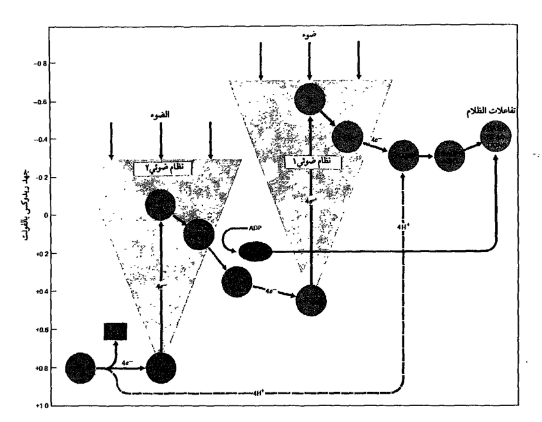
تنقل كل الأصباغ الأخرى الموجودة في البلاستيدة الخضراء طاقة التهيج بها الى P680 أو P700. ولهذا السبب فأن كلوروفيل ب وأشباه الكاروتينات والجزء الأكبر من جزيئـات كلوروفيـل أ توصـف أحيـانـا بأصبـاغ الاستشعـار antenna pigments. كل منها مهيأ لامتصاص أطوال موجة محددة بكل كفاءة والطاقة المكتسبة تنتقل بعد ذلك الى P680 أو P700 وهمـا فقط اللذان يحدث فيهـما التهيج عنـد سقـوط الضـوء على البـلاستيدات الخضر الكـاملة. ونـظرا لما لهما من دور حاسم في تفاعلات الأكسدة والاختـزال فـان P680 و P700 يسميان أصباغ التفاعل المركزية.

٨-٨ . النظم الضوئية ١ ، ٢ PHOTOSYSTEMS I AND II

إكتشاف صبغتي تفاعل مركزيتين هو إكتشاف جيد لأنه يساعد في تفسير خاصية أخرى من خصائص البناء الضوئي . فعندما يقارن المرء بين طيف النشاط للبناء الضوئي وطيف الإمتصاص للكلوروفيلات تظهر فوارق غريبة بينهما بوضوح. فالضوء الأحمر الذي له طول موجة أطول من حوالي ٦٨٠ نانومتر غير فعال في تنشيط البناء الضوئي مع أن كلوروفيل أ يمتص الضوء عند طول الموجة هذا. في عام ١٩٥٦ ذكر روبرت إيمرسون ومعاونوه أن النقص الحاد في كفاءة البناء الضوئي عند أطوال موجة أكبر من ٦٨٠ نانومتر يمكن التغلب عليه إذا أضيئت البلاستيدات الخضر في نفس الوقت بضوء أقصر في طول موجته. عند الأضاءة بشعاعين من ضوء أحادي اللون في نفس الوقت - مثلا ٦٧٠ نانومتر و ٧١٠ نانومتر فأن كفاءة البناء الضوئي تزيد كثيرا عما لو كانت الأضاءة بشعاع واحد له طول موجة يساوي مجموع طول موجة الشعاعين معاً. قادت هذه الملاحظة إلى الإستنتاج أن تفاعلات الضوء لابد أن تشتمل على عمليتين متمييزتين: إحداهما تستمد الطاقة من طول الموجة الكبير وتعرف بالنظام الضوئي ١ والثانية تستمدها من طول الموجة القصير وتسمى النظام الضوئي ٢ . ولم يمكن التوصل حتى الآن الى كل التفاصيل التي يعمل بها النظامين الضوئيين ومع ذلك فالخطوات الأساسية موضحة في الشكل ٨-٢١.

النظام الضوئي ١ PHOTOSYSTEM I

الطاقة التي جمعتها أصباغ الاستشعار في النظام الضوئي ١ تنتقل الى جزىء P700 ترتفع إليكترونات في P700 الى مستوي طاقة من العلو (حوالي - ٦ , ٠ فولت) بحيث يمكنه إختزال مستقبل للأليكترونات مبين في الشكل ٨-٢١ بالرمز ×. تعطى المادة X إليكترونها (أي تختزل) لبروتين يحتوي على الحديد يسمى فيردوكسين ferredoxin. يعطي الفيردوكسين إليكترونات بعد ذلك الى $NADPT^+$ فيختزله إلى NADPH الذي تحتاجه تفاعلات الظلام. وبهذه الطريقة يوفر الضوء الممتص في النظام الضوئي ١ الطاقة اللازمة لأكسدة P700 و إختزال $NADPT^+$ الى NADPH. ولكن الإليكترونات المستعملة في إختزال$NADPT^+$ تستعمل بعد ذلك في تفاعلات الظلام لتخليق PGAL. فأذا كان للنظام الضوئي ١ أن يستمر في العمل فلا بد له من إحلال



الشكل ٨-٢١ . تفاعلات الضوء في البناء الضوئي. الارتفاع النسبي لكل حامل اليكترونات يعكس جهدة في الأكسدة والاختزال (المحور ٢). في الفسفرة الضوئية الحلقية تدور الأليكترونات (عكس عقارب الساعة) من x الى PQ ثم الى × فتولد في طريقها ATP. كل أصباغ و أنزيمات تفاعلات الضوء تحويها أغشية الحبوب. FD = فيريدوكسين.

هذه الأليكترونات وذلك باللجوء الى النظام الضوئي ٢ .

النظام الضوئي ٢ PHOTOSYSTEM II

يؤدي امتصاص الضوء في النظام الضوئي ٢ الى أكسدة P680 بطريقة مطابقة تماما لما يحدث فـي النظـام الضـوئـي ١ ولكـن P680 المؤكسد هو عامل أكسدة أقوى من P700 وبما له من جهـد ريدوكس مقداره أكبر من + ٠,٨٢ فولت يكون له سالبية كهـربية تكفى لأكتسـاب اليكترونات من (و من ثم يختزل بواسطة) جزيئات الماء. الخطوات الدقيقة ليست معروفة على وجه اليقين ولكن لكل أربعة اليكترونات يكتسبها P680 يتحرر جزيء أكسجين

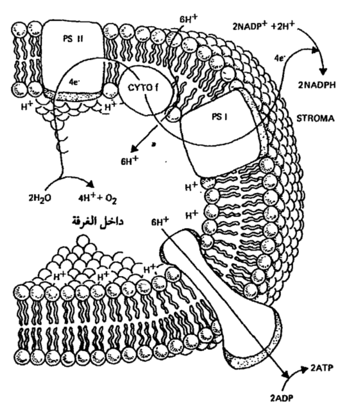
$$2H_2O \rightarrow 4e^- + 4H^+ + O_2$$

أمتصاص الضوء يرفع هذه الأليكترونات الى مستوي طاقة بحيث تتمكن من أختزال P700 في النظام الضوئي ١ . وعلى ذلك نكون قد وجدنا واحدا من المكونات الأساسية لتفاعلات الظلام وهو ألية توفير الطاقة التي تمكن الأليكترونات من الحركة في مسار غير متقطع من الماء الى NADP.

ولكن علينا الان أن نجد ATP وهو المكون الأساسي الثاني لتفاعلات الظلام وهذا أيضا يتولد من تفاعلات الضوء في النباء الضوئي . في عام **١٩٥٤** بين دانيل أرون أنه عند أمداد البلاستيدات الخضر المعـزولـة بمـادة ADP وفوسفات غير عضوية ثم تضاء فأنها لا تلبث أن تكون ATP. وقد سمى أرون هذه العملية باسم الفسفرة الضوئية photophosphorylation لأنها عملية فسفـرة يحفـزهـا الضـوء . وعـلى ذلـك فأن البلاستيدات الخضر يمكنها استغلال الطاقة الضوئية مباشرة في تخليق ATP. دعنا الأن ندرس ألية ذلك .

امتصاص الضوء في النظام الضوئي ٢ يرفع الاليكترونات المطرودة من P680 الى جهـد ريدوكس قيمتـه حوالي -٠,٠٥ فولت (الشكل ٨-١٢) وهذا يزيد بمقدار **٠,٤٥** فولت عن المطلوب لاختـزال P700 في النـظام الضـوئي ١ . وعلى ذلك فإن الأليكترونات المنقولة من مستقبل الأليكترونـات فـي P680 (يسمـى Q) الـى P700 تمر الى أسفل فرق جهد كبير. ومثلما يكون هناك احتياج للطاقة لـرفـع اليكترونات ضد فرق جهـد فان الـطاقة تنطلق عندما يسمح للأليكترونات بالنزول في فرق الجهد . تنساب الأليكترونات من Q الى P700 من خلال نظام لحاملات الأليكترونات يشتمل على أنزيمي سيتوكروم مشابهين لما هو موجود في الميتوكوندريا . وتستخدم الطاقة المنطلقة في هذا الأنسياب في تخليق ATP. وكما في حالة الميتوكندريا فان هناك دليلا قويا على أن الأوزموزية الكيميائية (راجع الجزء ٧-١٠) توفر ألية الربط بين انتقال الأليكترونات وتخليق ATP.

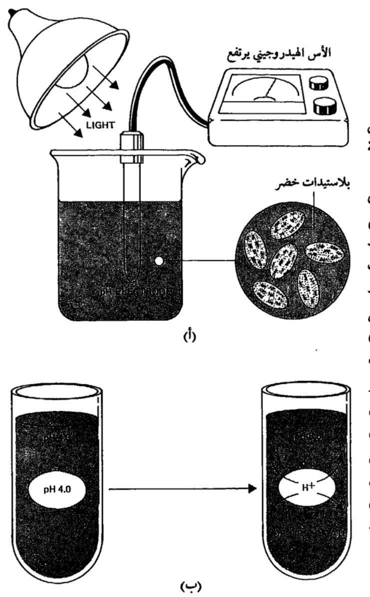
ولعلك تتذكر أن نظرية الأوزموزية الكيميائية تقول أن طاقة إنتقال الأليكترونات تستخـدم لضـخ بروتـونات في إتجاه واحد عبر الغشاء . في الميتوكوندريا يكون ضخ البروتونات من داخل الثنيات الى الحشوة matrix التي بين الثنيات وغشاء الميتوكوندريا . في البلاستيدات الخضر تنتقل البروتونات في الأتجاه المضاد. عبور الأليكترونات بين



الشكل ٨-٢٢. ربط تخليق ATP بنقل الاليكترونات في الأغشية الثايلاكويدية حسب نظرية الأوزموزية الكيميائية. عبور الأليكترونات من النظام الضوئي ٢ الى النظام الضوئي ١ يتسبب في نقل البروتونات (ضد فرق تركيزهم) الى داخل الغشاء الطاقة المنطلقة أثناء عودة هذه البروتونات (الان في اتجاه فرق تركيزهم) ترتبط بتخليق ATP. يحدث هذا في معقد انزيمي في الغشاء الثايلاكويدي وهو يختلف تماما عن المعقد الانزيمي الخاص بنقل الاليكترونات. في الفسفرة الضوئية غير الحلقية تستعمل الاليكترونات المنشطة في النظام الضوئي ١ في اختزال NADP الى NADPH.

النظام الضوئي ٢ والنظام الضوئي ١ يضخ البروتونات من الحشوة stroma الى داخل الثايلاكويدات. هذه البروتونات لايمكنها العودة الى الحشوة إلا عن طريق الأنزيمات المعقدة التي تقوم بتخليق ATP وهذه تكون منغمسة في أجزاء الصفائح المواجهة للحشوة (الشكل ٨-٢٢).

هناك عدة أنواع من الأدلة التي تؤيد نظرية الأوزموزية الكيميائية لتخليق ATP في البلاستيدات الخضر. فعند إضاءة بلاستيدات خضر معزولة يصبح الوسط الذي تكون معلقة به قلوياً (الشكل ٨-٢٣). ويفترض أن البروتونات المنزوعة من الوسط يتم ضخها في الثايلاكويدات لينخفض الأس الهيدروجيني إلى ٤ أو نحو ذلك. ويمكن جعل داخل الثايلاكويدات حامضياً عن عمد وذلك بتعليق البلاستيدات الخضر المعزولة في وسط حامضى (أس هيدروجيني ٤) لفترة من الزمن. وعند تعريض هذه البلاستيدات بسرعة لوسط قلوى (أس هيدروجيني ٨,٥) ثم إمدادها بمادة ADP



الشكـل ٨-٢٣. دليـل يؤيـد نظرية الأوزموزية الكيميائية في البناء الضوئي. (أ) عندما يسطع الضوء على البلاستيدات الخضر يرتفع الأس الهيدروجيني للوسط كما نتوقع اذا كانت البروتونات تنتزع من الوسط وتنقل الى داخل البلاستيدات الخضر. (ب) عندما توضع البلاستيدات الخضر المحتوية على تركيز عالي من البروتونات (أس هيدروجيني منخفض) في وسط يحتوي على تركيز أقل من البروتونات (أس هيدروجيني أعلى) فانها تقوم تلقائيا بتخليق ATP من ADP وفوسفات غير عضوية بدون الحاجة الى الضوء.

وفوسفات غير عضوية فأنها تقوم بتخليق ATP تلقائيا (الشكل ٨-٢٣). لاتوجد حاجة الى الضوء. هنا إذن دليل مباشر على إمكانية تأمين فرق في البروتونات لتخليق ATP.

تبقي مشكلة واحدة. هل الفسفرة الضوئية التي تحدث عندما تمر الأليكترونات من النظام الضوئي ٢ الى النظام الضوئي ١ كافية لتغطية إحتياجات تفاعلات الظلام؟ دعنا نحصر هذه الأحتياجات. هناك حاجة لأربعة إليكترونات لكل جزيء ثاني أكسيد

كربون يتم إختزاله. عند إعادة النظر في الشكل ٨-١٨ نعرف سبب ذلك. أخذ كل جزيء ثاني أكسيد كربـون يتمخض عن إنتـاج جـزيئـين من PGA. إختـزال هذين الجـزيئـين يتطلب إثنين من NADPH و من هنا تنشأ الحاجة الى أربعة اليكترونات. تتطلب العملية كذلك جزيئين من ATP ولكن تذكر أن ATP مطلوب أيضا لتحويل فوسفات الريبيولوز الى ثنائي فوسفوفات الريبيولوز (الشكل ٨-١٨). وعلى ذلك يكون مطلوب ٣ جزيئات ATP لكل جزيئين من NADPH في تفاعـلات الظـلام. وعلـى الرغـم من أن الأرقـام مازالـت غير مؤكـدة فأنـه يبـدو أن مرور أربعة إليكترونات من Q الى P700 يضخ ٦ بروتونات الى الحشوة. عندما تعود الأليكترونات الستعن طريق إنـزيمات تخليق ATP يتم تخليق جزيئين فقط من ATP. وعلى ذلك فأن الأليكترونات الأربعة المـطلـوبـة لتوليد جزيئين من NADPH ينتجان أيضا جزيئين فقط من ATP على الرغم من الأحتياج الى ثلاثة. فأذا صحت هذه التقديرات وكان هناك جزيئان فقط من ATP يتم تخليقها عند عبور أربعة اليكترونات من النظام الضوئي ٢ الى النظام الضوئي ١ فانه لابد أن يكون لدى البلاستيدة الخضراء حيلة أخرى للتغلب على ذلك.

الفسفرة الضوئية الحلقية CYCLIC PHOTOPHOSPHORYLATION

أحد الأحتمالات التي إكتشفها أيضا دانييل أرون سميت الفسفرة الضوئية الحلقية. في هذه العملية يقـوم الضــوء الممتص في النـظام الضـوئي ١ بتهيـج P700 وطـرد إليكترونات منه لتكتسبها المادة X (الشكل ٨-٢١). ولكن بدلا من إعطاء إليكتروناتها إلى الفيريدوكسين فأن المادة X تختزل البلاستوكينون plastoquinone (PQ). وعند رجوع هذه الأليكترونات الى P700 فأن بعض الطاقة الحرة التي تنطلق منها ترتبط بتخليق ATP تماما كما في حالة الفسفرة الضوئية. ولكن هذه العملية تتم بصورة حلقية حقيقية حيث لاتوجد حاجة الى أي مصدر خارجي للأليكترونات. وكما يحدث في الخلية الضوئية المـوجـودة بمقياس الضـوء فان النظام الضوئي ١ يستعمل الضوء ببساطة لخلق تيار ينساب والفرق الوحيد هو أنه بدلا من إستعمال التيار لتحريك الأبرة في مقياس الضوء فان البلاستيدة الخضراء تستعمـل التيـار في تخليـق ATP. تقوم البلاستيدات الخضر المعزولة بهذا على الأقل في التحضيرات في أنبوبة الأختبار.

ما تزال هناك شكوك حول ما إذا كان للفسفرة الضوئية دور هام في تخليق ATP في

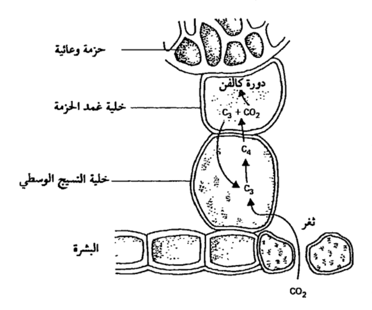
الخلايا الكاملة. فأذا ما ظهر أن الأجابة بالنفي فلابد أن تكون هناك إحتمالات أخرى. فمثلا إقتراح البعض أنه إذا كانت كمية الفيريدوكسين المختزلة أكبر مما هو مطلوب لأنتاج NADPH فأن الزيادة لابد أن تستعمل لأختزال الأوكسجين المتصاعد من النظام الضوئى ٢ الى ماء. ويبدو ذلك للوهلة الأولى كضياع غير مثمر لكل العمل الشاق الذي يشتمل عليه البناء الضوئي. لكن تمهل. فعلى الرغم من أن الأليكترونات تكمل الحلقة من الماء الى الفيريدوكسين ثم بالعكس فأن جزءا من مسارها يمر بخطوة توليد ATP التي تربط النظام الضوئي ٢ بالنظام الضوئي ١. هنا إذن طريق آخر يؤدي فيه تسليط الضوء فقط الى وصول طاقة الى الأليكترونات تكفى لتخليق ATP.

أنه لعمل سهل نسبيا أن تتهتك البلاستيدات الخضر المعزولة وتنفصل منها الثايلاكويدات المحتوية على الأصباغ عن الحشوة. وحينئذ تحتفظ الثايلاكويدات بقدرتها على الفسفرة الضوئية ولكنها لاتستطيع تحويل ثاني أكسيد الكربون الى كربوهيدرات ومع ذلك يمكن للحشوة عديمة اللون القيام بذلك عند إمدادها بثاني أكسيد الكربون و ATP و NADPH. وعلى ذلك هناك توزيع للعمل داخل البلاستيدة الخضراء: تفاعلات الضوء هي مسئولية الحبوب grana بينما تقوم الأنزيمات الموجودة في الحشوة بتفاعلات الظلام.

٨-٩. نباتات ك ٤ C_4 PLANTS

حينما تعامل بعض النباتات (مثل قصب السكر والذرة والذرة الرفيعة) بطرق كالفن فإن أول النواتج تكون مركبات رباعية الكربون مثل حامض الأوكسالوخليك oxaloacetic acid وحامض الماليك malic acid وحامض الأسبارتيك aspartic acid بدلا من PGA ثلاثى الكربون. ثم لايلبث الكربون المشع أن يظهر في PGA وتستمر دورة كالفن. وقد ظهر أن هذه النباتات (تسمى نباتات ك ٤ C_4) تقوم بتثبيت ثاني أكسيد الكربون أولا من خلال مسار رباعي الكربون موجود في الخلايا القريبة من سطح الورقة ثم تنقل ثاني أكسيد الكربون الى الخلايا الداخلية للورقة حيث تعمل الدورة ثلاثية الكربون (الشكل ٨-٢٤).

يعمل جهاز الأصطياد رباعي الكربون عند تركيزات منثاني أكسيد الكربون(١-٢ جزء في المليون) تقل كثيرا عن النظام رباعي الكربون الذي يتوقف عن العمل عند



الشكـل ٨-٢٤. مسار تثبيت الكربون في نباتات ك٤. يؤخذ ثاني أكسيد الكربون بواسطة المركب ثلاثي الكربون حامض فوسفو اينول بيروفيك لتكوين حامض أوكسالوخليك وهو مركب رباعي الكربون (أنظر الشكل ٧-٧). يتحول حامض أوكسالوخليك إلى حامض ماليك وحامض اسبارتيك وينقل الى خلايا غمد الحزمة حيث يتكسر المركب رباعي الكربون الى ثاني أكسيد كربون وحامض بيروفيك (ك٣). يدخل ثاني أكسيد الكربون في دورة كالفن لتكوين سكرات ونشا. ينتقل حامض البيروفيك الى خلايا النسيج المتوسط حيث يتحول الى PEP. تقوم البلاستيدات الخضر في خلايا النسيج المتوسط بالتفاعلات الضوئية للبناء الضوئي ولكن ينقصها الانزيم الذي يضيف ثاني أكسيد الكربون الى ثنائي فوسفات ريبيولوز لبدء تفاعلات الظلام في دورة كالفن.

تركيزات أقل من ٥٠ جزء في المليون. ولذلك فأنه في يوم شديد الحرارة تستطيع نباتات ك٤ أن تغلق ثغورها لتقليل الماء المفقود بالنتح وتظل تحصل على ثاني أكسيد الكربون اللازم للبناء الضوئي وذلك لأن هذه النباتات تخلق فرقا هائلا في تركيز ثاني أكسيد الكربون (٣٠٠ جزء في المليون بالهواء الجوي وجزء واحد في المليون داخل الأوراق) يسمح بإنتشاره بذلك تعوض على الأقل جزئياً ما نجم عن إغلاق الثغور. ولهذا السبب تكون نباتات ك٤ مهيأة بصفة خاصة للبيئات التي ترتفع فيها حرارة النهار وتقل رطوبة التربة وتزيد شدة الضوء.

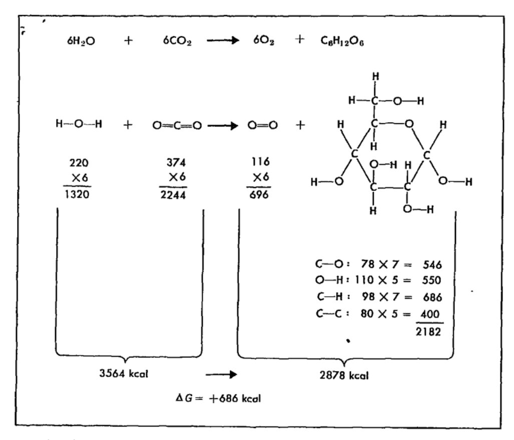
ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

على الرغم من أن هناك أسئلة باقية بدون إجابات إلا أنه لاشك في أن تفاعلات الضوء هي سر عملية البناء الضوئي أي القدرة على تكوين مركبات غنية بالطاقة مثل الكربوهيدرات من مركبات فقيرة في الطاقة مثل ثاني أكسيد الكربون والماء. في

التفـاعـلات الضـوئية يتم إصـطياد طاقة الضوء وتحويلها الى طاقة حرة في جزيئات عضوية . فـي البدايـة تكـون هـذه الجزيئـات مـواد كربوهيـدراتيـة وسبـب ذلـك أن النـشـاط الأختـزالي الـذي توفـره التفــاعـلات الضـــوئيـة يكفـي فقـط لإختـزال الكربـون الـى الدرجـة التـي توجـد في المـواد الكربوهيـدراتيـة أي الى نصف أقصـى إختـزال ممكـن ($CO_2 \rightarrow CH_4$ ضد $CO_2 \rightarrow CH_2O$) و بالطبع تقوم النباتات بتخليق مركبات أكثـر إختـزالا مثل البـروتينـات والدهون (مثل $C_{57}H_{98}O_6$ ثلاثي لينولين) . ولكن ذلك يتم بطريقة لاتختلف عما يحدث في الكائنات متباينة التغذية . فنحن نستطيع تخليق الدهون من المواد الكربوهيدراتية ولكننا لابد أن نبذل الطاقة الحرة الموجودة في ATP. محتوي الطاقة في الدهون أكبر بكثير منه في الكربوهيدرات وفي النباتات كما في أنفسنا لابد من تعويض الفارق بتفاعلات ظلام يدفعها ATP.

في الباب السابق درسنا التوازن الأجمالي للطاقة في التنفس الخلوي وقد قمنا بذلك عن طريق إيجاد مجموع طاقات الروابط لكل المواد الداخلة في التفاعل ثم طرحه من مجموع طاقات الروابط لكل المواد الناتجة منه (أنظر الى الشكل ٧-١٥) . فهل يمكننا أن نفعل نفس الشيء بالنسبة للبناء الضوئي . نعم . لكي نكسر روابط ٦ جزيئات ماء (يمكننا الآن إغفال جزيئات الماء الستة التي تظهر على جانبي المعادلة) وستة جزيئات من ثاني أكسيد الكربون فإننا نحتاج الى إدخال ٣٥٦٤ كيلو سعر من الطاقة . تكوين الروابط الموجودة في جزيء جلوكوز (٢١٨٢) وستة جزيئات من الأوكسجين (٦٩٦) يطلق ٢٨٧٨ كيلو سعر (الشكل ٨-٢٥) . الفرق هو ٦٨٦ كيلو سعر وهو يمثل الطاقة المختزنة . وعلى ذلك نعبر عن التغير في الطاقـة الحـرة $\Delta G = + 686$ وهو ببساطة عكس ميزانية الطاقة في التنفس الخلوي مصحوبا بالعلامة + بدلا من علامة −

وبـالمثـل يمكننـا القيام بتحليل التغـيرات في جهـد الأكسدة والأختزال في البناء الضوئي . فكما حدث في الباب (٧) إذا أعتبرنا جهد الأكسدة والأختزال للكربوهيدرات هو −٠,٢٤ فولت (وهذا تقريب معقول) وللأوكسجين هو + ٠,٨٢ فولت فأن البناء الضـوئي يكـون قد نقـل اليكـترونـات خلال جهـد مقدارة ١,٢٤ فولت (الشكل ٨-٢٠) . من أجـل تخليق جزيء جلوكـوز لابـد للتفاعلات الضوئية أن تنقل ٢٤ اليكترون . فأذا أستعملنا ثابت فاراداي وقيمته ٢٣,٠٦٢ كيلو سعر لكل اليكترون فولت فأننا نصل مرة أخرى الى القيمة ٦٨٦ كيلو سعر



الشكل ٨-٢٥ . علاقات طاقة الروابط في البناء الضوئي. الفرق في الطاقة الحرة اللازمة لكسر روابط المواد الداخلة في التفاعل والطاقة المنطلقة من تكوين المواذ الناتجة منه هو ٦٨٦ كيلو سعر / مول وهو محصلة الطاقة الحرة للتفاعلات. مصدر هذه الطاقة هو الضوء الذي تمتصة الكلوروفيلات وأصباغ الاستشعار الاخرى.

$$\Delta G = (24)(23.062)(1.24) = 686 \text{ Kcal}$$

الفـرق الوحيـد هنـا هـو أن ΔG تكون موجبة لأن الأليكترونات تنتقل ضد الجهد (من موجب الى سالب) بدلا من أن تنتقل مع الجهد كما هي الحال في التنفس الخلوي . ولذلك لابد من إضافة طاقة لإتمام العمل.

وعلى ذلك نرى أن البناء الضوئي والتنفس الخلوي هما عمليتان مكملتان لبعضهما البعض من عدة نواحي ويكـون إنتقـال الأليكـترونات في قلب كل منهما. في البناء الضـوئي تستغـل طاقة الشمس لنزع إليكترونات من ذرات الأوكسجين الموجودة في جزيئات الماء وتنتقل هذه الأليكترونات الى ذرات الكربون لتكون روابط تساهمية بين

الكربون والهيدروجين. والكربون ذو سالبية كهربية أقل بكثير من الأوكسجين وتبعاً لذلـك يكون هناك إحتياج الى طاقة لإتمام هذا النقل وأغلب هذه الطاقة يختزن في الروابط التساهمية الناشئة. وبهذه الطريقة تبني كل الكائنات التي تقوم بالبناء الضوئي جزيئات الغذاء التي تعتمد عليها كل الكائنات.

في التنفس الخلوي تنتـزع الأليكـترونات من حزيئات الغذاء ويسمح لها بالعودة خطوة بخـطوة الى ذرات الأوكسجين وعندما تفعل ذلك فأنها تتخلى عن الطاقة التي إختـزنتهـا والجـزء الأكـبر من هذه الطاقة يتحـول الـى الطاقـة المختزنة في ATP. في التحليل النهـائي إذن فإن سريان الطاقة في كل الكائنات الحية يعتمد على الإنتقال الحلقي للأليكترونات بين ذرات الأوكسجين وذرات الكربون الذي يتم بتكسير (في البناء الضوئي) وتخليق (في التنفس الخلوي) جزيئات الماء.

في هذين البابين إذن درسنا كيفية شحن وتفريغ بطاريات الحياة.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ـ من أي المـادتين الخام اللتين يستعملهما النبات يأتي الأوكسجين المتصاعد في عملية البناء الضوئي؟

٢ ـ كم كيلو سعر من الطاقة الضوئية تكون مطلوبة لضخ ١ مول من الأليكترونات من P700 الى المـادة X ؟

٣ ـ يمكن وصف الحياة بأنها أسـاسا عملية نقل اليكترونات بين مستويات طاقة مختلفة. دافع عن هذا الرأي.

٤ ـ ميز بين كائن ذاتي التغذية وآخر متباين التغذية.

٥ ـ ما هو اللون الذي تمتصه الأوراق الخضراء أقل مايمكن؟

٦ ـ هل تعتقد أن معدل البناء الضوئي يستمر في الزيادة الى ما لانهاية بزيادة درجة الحرارة ؟ إشرح.

٧ ـ هل تعتقد أن معدل البناء الضوئي يستمر في الزيادة الى ما لانهاية بزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون ؟ إشرح .

٨ ـ عندما يقوم الطلاب بأجراء التجربة المبينة في الشكل ٨-١٣ مبتدئين بأقل شدة إضاءة فأنهم غالبا يجدون أن معدل البناء الضوئي لايستقيم بدقة فما هو العامل

الذي أهملوا تثبيته؟

٩ ــ الطلاب الذين أخذوا وقتا طويلا جدا لأداء التجربة المبينة في الشكل ٨-١٣ غالبا يجدون أن معدل البناء الضوئي يبدأ في النزول عند شدة إضاءة عالية . هل يمكنك إيجاد تفسير لذلك ؟

١٠ ــ في عامودين أذكر أكبر عدد ممكن من أوجة الأختلاف بين البناء الضوئي والتنفس .

١١ ــ هل تحتاج النباتات الخضراء إلى إنزيمات هاضمة ؟ إشرح .

١٢ ــ كم عدد الأليكترونات التي تنتزع من جزيئات الماء لكل جزيء أوكسجين ينتج من البناء الضوئي؟

١٣ ــ كم عدد الأليكترونات المطلوبة لكل جزيء ثاني أكسيد الكربون الداخل في البناء الضوئي؟ وكم عدد جزيئات NADPH ؟ وكم عدد جزيئات ATP ؟

المراجع REFERENCES

1. GABRIEL, M. L. and S. FOGEL, eds., Great Experiments in Biology, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1955. Contains brief firsthand report of the experiments of Van Helmont, Pristley, Ingen-Housz, Englemann, and Van Neil as well as the ^{18}O-tracer experiments done at the University of California.
2. MILLER, K. R., "The Photosynthetic Membrane", Scientific American, Offprint No. 1448, October, 1979. Three types of particles in thylakoid membranes are revealed by electron microscopy.
3. LEVINE, R. P., "The Mechanism of Photosynthesis" Scientific American, Offprint No. 1163, December, 1969.
4. BJORKMAN, O., and J. BERRY, "High - Efficiency Photosynthesis", Scientific American, Offprint No. 1281, October, 1973. The anatomy and physiology of C_4 plants.
5. ARNON, D. I., "The Role of Light in Photosynthesis, "Scientific American, Offprint No. 75, November, 1960. The light reactions.
6. BASSHAM, J. A., "The Path of Carbon in Photosynthesis, "Scientific Amer-

ican, Offprint No. 122, June, 1962. The dark reactions.

7. GOVINDJEE and RAJNI GOVINDJEE, "The Primary Events of Photosynthesis, "Scientific American. Offprint No. 1310, December, 1974. The parts played by the antenna pigments and the reaction center pigments of photosystms I and II.

CHAPTER 9 الباب التاسع

CELL DIVISION انقسام الخلية



الباب التاسع

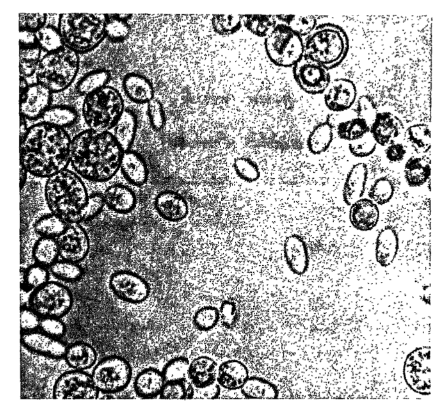
انقســام الخليــة

٩-١ . الاستمرار الوراثي للخلايا
THE GENETIC CONTINUITY OF CELLS

أحد المعتقدات الهامة لعلماء الأحياء في القرن التاسع عشر هو أن كل خلية على الأرض نشأت من خلية سبقتها. وهذا صحيح سواء بالنسبة للأحيــاء الدقيقة وحيدة الخلية مثل الخميرة أو أي خلايا نسيجية (مثل خلايا الدم) في الكائنات عديدة الخلايا. فكل خلية في أجسامنا جاءت من خلية سبقتها وفي كل مثال يمكن تتبع منشأ الخلية حتى البويضة المخصبة التي بدأت منها حياتنا. وهذه نتجت من الحيوان المنوي للأباء وخلية البويضة من الأمهات. وهذه بدورها نشأت من خلايا أخرى في أجسامنا وهكذا.

يمكن مشاهدة محور موضوع تكاثر الخلية بوضوح أكبر في الكائنات وحيدة الخلية. خلية خميرة واحدة توضع في وسط ملائم لاتلبث أن تعطى ذرية بالألاف (الشكل ٩-١) ومع إستبعاد الحوادث الطارئة فإن كل واحدة من هذه الذرية يكون لها نفس الخصائص التركيبية والوظيفية التي كانت للخلية الأولى.

أمكن إستغلال إستمرار الصفات من أحد أجيال الخلايا الى الذي يليه في صناعة البيرة. يعتمد طعم البيرة (أو الجعة) على عدد من العوامل من أهمها سلالة الخميرة المستعملة في عملية التخمر fermentation. في الحالات العادية تضاف عدة أرطال من خلايا الخميرة الى وعاء به عدة مكونات مختلفة منها مادة كربوهيدراتية كمصدر للطاقة. وبعد أربعة أو خمسة أيام تكون كمية الخميرة قد تضاعفت ثلاث أو أربع مرات ويؤخذ



الشكـل ٩-١ . خلايا خميرة نامية في مزرعة. تتكاثر الخلايا لا جنسيا بتكوين براعم ولا تلبث البراعم أن تنفصل عن الخلايا الام وتبدأ حياة مستقلة. كل الخلايا المنحدرة عن نفس الخلية تكون فيما بينها جماعة.

جزء من هذه العشيرة ويحفظ بعناية كي يستعمل في بدء كمية جديدة من البيرة أو الجعة. ولابد من العناية الفائقة دائما حتى لاتختلط سلالة الخميرة بأي أحيــاء دقيقة أخرى. وبفضل هذه الاحتياطات يمكن إستعمال نفس السلالة من الخميرة لعدة عشرات من السنين في إنتاج نوع فريد من الجعة أو البيرة. وحتى مع معدل النمو البطيء تحت الظروف السائدة في إنتاج البيرة فان الخلايا المستعملة هي نتاج ٣٠٠٠ جيل - ومع ذلك تبقي صفات خلايا الخميرة الأصلية بدون تغيير.

في هذا المثال تنجب خلايا الخميرة ذريتها بالتكاثر اللاجنسي asexual reproduction حيث يشتركون جميعا في تركة وراثية واحدة لأن كل منها نشأت من الأنقسام المستمر للخلايا التي وضعت في الوعاء لأول مرة. وتوصف كل خلية بأنها عضو في نفس الجماعة clone.

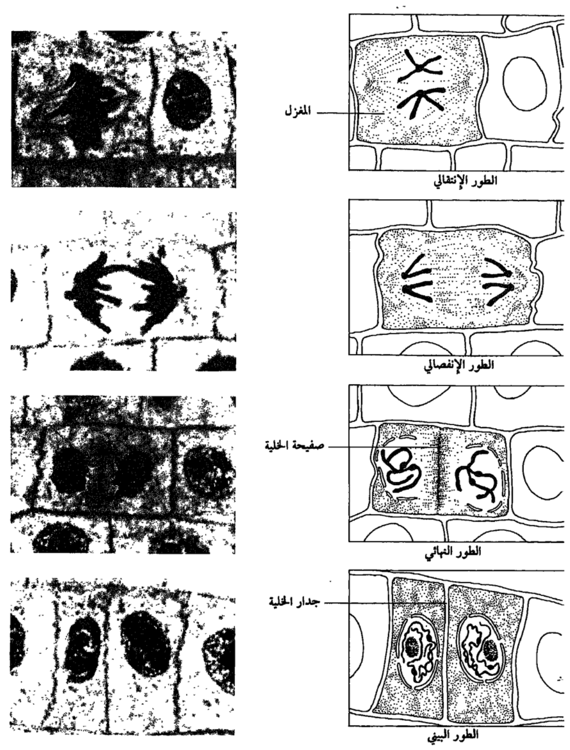
مشكلتنا إذن هى تفسير قدرة الخلايا على تكرار صفاتها بنفسها. في الباب (٥) رأينا كيف أوضح بوفري أن الصيغة الوراثية تقبع في النواة. ماالذي يحوى هذه الصيغة في النواة ؟ عندما تنقسم الخلية كيف تنتقل المعلومات الموجودة في هذه الصيغة الوراثية إلى خلاياها البنوية daughter cells ؟ كما سنري في الباب (١١) فان إجابة السؤال الأول هي الكروموسـومـات (أو الصبغيات) chromosomes أما اجابة السؤال الثاني فهي الانقسام غير المباشر (أو الفتيلي).

٩-٢ . الانقسام غير المباشر MITOSIS

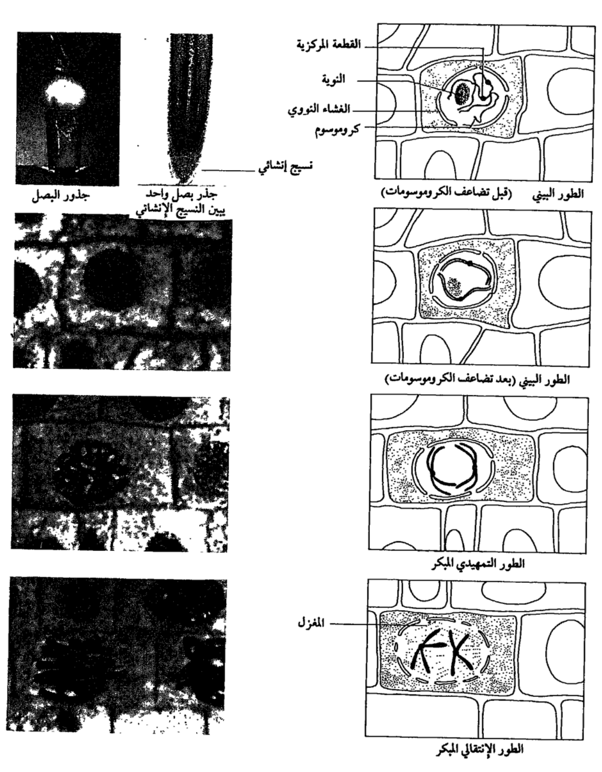
نسيج ملائم لدراسة الانقسام غير المباشر هو النسيج الانشائي عند القمة النامية لجذر البصـل. ويمكن تلوين الكروموسومات بصبغة مناسبة حتى يمكن مشاهدتها (الشكل ٩-٢). الخلية التي تتكون حديثا في البصل تحتوي على ١٦ كروموسوم منها ٨ ساهم بها الأب لنبات البصل أي النبات الذي قدم الأمشاج (أو الجاميطات) المذكرة male gametes. هذه الكروموسومات غالبا تسمى الكروموسومات الأبوية parental. أما الكروموسومات الثمانية الأخرى فقد جاءت أصلا من أم نبات البصل أي النبات الـذي قدم البيضـة وهذه هي الكروموسومات الأمية maternal. يوجد في مقابل كل كروموسوم أبوى كروموسوم أمى يشبهه تماما. وهذه الكروموسومات المتشابهة تشكل فيما بينها أزواج متماثلة homologous pairs وكل عضو في أي زوج متماثل يسمى غالبا مثيل homologue للعضو الآخر في الزوج.

حينما لاتكون الخلية في حالة إنقسام لايمكن مشاهدة الكروموسومات (التي توجد في النواة) بواسطة المجهر الضوئي. فهي رقيقة لدرجة لا تمكنها من إمتصاص قدر كبير من الصبغـة لتكشف عن طبيعتهـا الحقيقيـة . وحينما تكون الكرومـوسـومات فـي هـذه الحالـة فانهم أحيانا يعطـون تسميـة جماعية هي كروماتين chromatin النواة. ومن الناحية الكيميائية يتكون الكروماتين من كميات متساوية تقريبا من الحامض DNA والبروتين مع كمية ضئيلة من الحامض RNA.

في كثير من الخلايا بما في ذلك خلايا البصل يكون لواحد أو أكثر من الكروموسومات نوية nucleolus متصلة به و هذه يمكن مشاهدتها بسهولة تحت المجهر الضوئي. والحالة الرقيقة للكروموسومات أثناء الفترة بين إنقسامات الخلية لاتعنى أنهم خاملون في هذا



الشكل ٩-٢. الانقسام غير المباشر في نبات. الصور توضح الأطوار كما تحدث في الخلايا المنقسمة في قمة جذور البصل. (بتصريح من شركة كارولينا للأمدادات الاحيائية المحدودة). الرسوم توضح الأطوار



بطريقة نصف تخطيطية . من أجل الوضوح هناك زوج متماثل واحد فقط مبين في الرسوم أحد أفرادة باللون الأسود والاخر ملون.

الـوقت. فهم نشيطون للغـاية في تخليق الحـامض RNA وقبيل بدء الانقسـام التالي ينشطون في تخليق الحامض DNA أيضا. وفي الواقع تتضاعف بالضبط كمية الحامض DNA بين إنقسامات الخلية.

وقد قسمت الأحداث التي تقع في عملية الانقسام غير المباشر الى أربعة أطوار متتالية هي : الطور التمهيدي والطور الإنتقالي والطور الانفصالي والطور النهائي أما الفترة بين الانقسامات فتسمى الطور البيني interphase. ومن المهم أن نعلم أن هذه الأطوار ليست إلا وسيلة مناسبة لوصف الانقسام غير المباشر أما العملية الفعلية نفسها (فيما عدا بعض الحـالات الاستثنـائية) فتشتمل على تتابع متصل من الأحداث تتواصل بسلاسة فيما بينها. والصور المجهرية في الشكل ٩-٢ هي صور لحظية snapshots لهذه الأطوار المختلفة ولو أن الصور المتحركة تعطى تصوراً أفضل للعملية.

الطور التمهيدي PROPHASE

تتميز بداية الانقسام غير المباشر بعدة تغيرات فتبدأ النويات في الاختفاء بينما تبدأ الكروموسومات نفسها في الظهور. الخيوط الممتدة للكروموسومات تأخذ في الانكماش والإلتفاف في شكل حلزوني (الشكل ٩-٢) وفي أثناء ذلك تصير أقصر وأكثر سمكا وأسهل رؤية. في هذا الوقت يبدأ الغشاء النووي في الاختفاء.

تتضح الآن أهمية تضاعـف كميـة الحامـض DNA قبل بدء الانقسام غير المباشر ويعـود إلى الظهور كل واحد من الكروموسومات الستة عشر (٨ أزواج متماثلة) التي كانت موجودة في الخلية عند بداية تكوينها ولكنه يكون مزدوجا (الشكل ٩-٢). ويكون كل إزدواج منهم على إتصال ببعضه عند نقطة خاصة تسمـى القطعـة المركزيـة centromere أو kinetochore (الشكل ٩-٢).

وعلى الرغم من أن المصطلح ليس فنيا إلا أنه يمكن تسمية هذه الكروموسومات المـزدوجـة بالمـزدوج doublet (الشكـل ٩-٣) والمـألـوف أن يسمى كل تركيب منها كرومـوسـوم chromosome ويسمى كل من خيطيه كروماتيدة sister chromatid. ولسوء الحظ فان هذا المصطلح (على الرغم من شيوع إستعماله) إلا أنه يخفي حقيقة أن كل عضو في المزدوج يكافيء من كل النواحي كروموسوم من أولئك الذين تلقتهم الخلية عند



الشكل ٩-٣. الكروموسومات في خلية بشرة منقسمة من السلاماندر. الكروموسومات المتضاعفة (الكروماتيدات الأختية) مازالت متصلة ببعضها عند القطع المركزية (بتصريح من تيرتوكس).

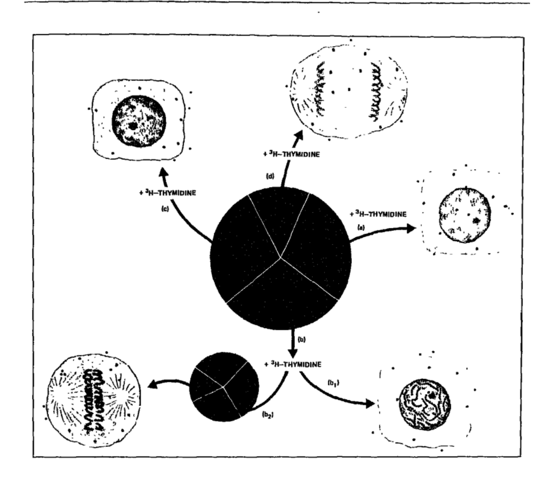
بدء تكوينها في إنقسام غير مباشر سابق. ومن هذا المنطلق فأن خلية البصل في الطور التمهيدي لاتحتوي على ١٦ كروموسوم وإنما ٣٢ كروموسوم يكونون ثمانية أزواج من المزدوجات المتماثلة.

الطور الانتقالي (أو الاستوائي) METAPHASE

يتميز الطور الانتقالي بظهور المغزل spindle. هذا التركيب يتكون من تجمع من الأنابيب الدقيقة microtubules (الشكل ٥-١٦) التي تمتد بين نهايتي أو قطبي الخلية. تتصل القطعة المركزية لكل مزدوج بعدد من هذه الأنابيب ثم تهاجر إلى نقطة في منتصف المسافة بين القطبين وقد تترتب الأطرف الحرة للكروموسومات عشوائيا ولكن تصطف القطع المركزية كلها تماما في مستوي واحد عند خط الاستواء "The equator". (الشكل ٩-٢).

الطور الانفصالي ANAPHASE

يبدأ الطور الانفصالي عندما تنفصل المزدوجات الكروموسومية (الكروماتيدات



الشكل ٩-٤. دورة الخلية. توقيت وموقع تخليق الحامض DNA يمكن تحديدهما بامدادها بالثايميدين المشع (³H-thymidine) ثم التصوير بالاشعاع الذاتي. لايظهر الاشعاع بكميات كبيرة الا أثناء المرحلة S ويكون محدودا في النواة (b) اذا سمح للخلية بالأنقسام غير المباشر (B) يمكن التحقق من وجود الاشعاع في الكروموسومات (بتصريح من د. أي. بات و جيل ر. بات: مقدمة في علم الوراثة الحديث - أديسون - ويزلي - ريدينج - ماساشوستس - ١٩٧٥).

الأختية) لكل كروموسوم عن بعضها ثم تتباعد (وهي ما زالت على المغزل) وتهاجر نحو الأقطاب المتعاكسة ساحبة خلفها أطرافها الحرة. ويبدو الحامل الأنفصالي metaphor طيعا لأن الأطراف الحرة للكروموسومات تتجه نحو خط الأستواء كما لو كان الأحتكاك مع السيتوبلازم المحيط بها يعطل حركتها نحو الأقطاب.

الطور النهائي TELOPHASE

الطور النهائي هو تقريبا عكس الطور التمهيدي. بمجرد أن تصل الكروموسومات

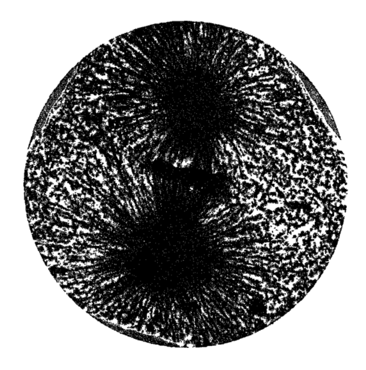
إلى القطبين تأخذ في التمدد وتعود النويات إلى الظهور ويبدأ غشاء نووى في التكوين حول الكروموسومات وفي النهاية يظهر تركيب يعرف بصفيحة الخلية cell plate عند خط الأستواء ويتم إفراز جدار الخلية على كل جانب من جانبي صفيحة الخلية وبذلك يكتمل إنقسام الخلية.

الطور البيني INTERPHASE

يجد علماء الخلية من المناسب تمييز ثلاث مراحل خلال الطور البيني. تبدأ الخلية مرحلة نمو (تسمى G_1) ويتبع ذلك فترة (S) من تخليق الحامض DNA تتضاعف أثناءها الكـروموسومـات ثم فتـرة نمو ثانيـة (G_2) وهي التي تسبق الأنقسام غير المباشر (M) التالي. هذه الفترات الأربع في الخلية المنقسمة هي التي تتكون منها دورة الخلية cell. cycle

توجد عملية الأنقسام غير المباشر كما سبق وصفها في جميع النباتات. وتنقسم الخلايا الحيوانية كذلك بالأنقسام غير المباشر وتكون الأطوار مشابهة لما يحدث في خلايا النباتات ويكون تصرف الكروموسومات متشابها. ومع ذلك يمكن ملاحظة إختلافين هامين أحدهما هو ظهور النجوم asters تحتوي الخلايا الحيوانية على الأجسام المركزية (أنظر القسم ٥-١٧) وفي الطور التمهيدي ترحل هذه إلى جانبي النواة وهنا يمكنها المساهمة في تكوين المغزل. ويوجد حول كل جسم مركزي نظام من الألياف المرتبة في ترتيب شعاعي هي النجم (الشكل ٩-٥). و وظيفة النجم غير معروفة. الأختلاف الثاني هوعـدم تكوين صفيحة خلية في الخلايا الحيوانية التي تمارس الأنقسام غير المباشر. وبدلا من ذلك يظهر أخدود في غشاء الخلية عند خط الأستواء. ويزداد الأخدود في العمق ويتم ببساطة فصم الخليتين البنويتين. وتعتمد هذه العملية على وجود حزام من الخيوط الـدقيقـة (أنـظر القسم ٥-١٤) التي تمتد حول الخلية ويبدو أنها توفر القوة الأنقبـاضية. ويبدو أن صفيحة الخلية في النباتات تكون مترتبة على الجدار الصلب للخلية الذي يمنع تكوين الأخدود.

كم يستغرق الأنقسام غير المباشر؟ قد يكتمل تتابع الأطوار في فترة تتراوح بين تسع دقـائق وعدة ساعات. ويختلف طول الفترة كثيرا حسب نوع الخلية والنوع species ودرجة الحرارة.

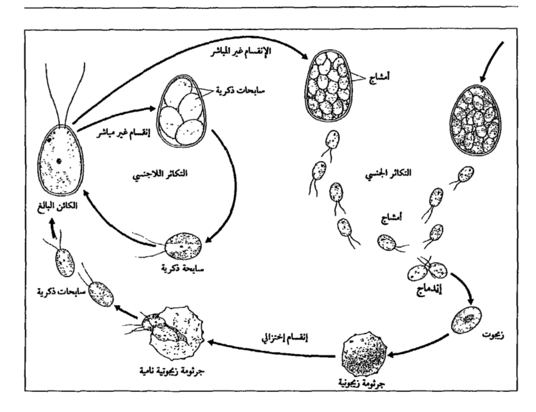


الشكل ٩-٥. الطور الانتقـالي في خليـة من جنين السمك الأبيض. لاحظ النجم الـواضـح عند كل قطب من قطبي الخلية.
(بتصريح من تيرتوكس)

ما هي أهمية الأنقسام غير المباشر ؟ أهم نشاط في الأنقسام غير المباشر هو السلوك المنظم للكروموسومات. في الحقيقة هذا الجانب من العملية من الأهمية بحيث أننا نظل نطلق عليها اسم الأنقسام غير المباشر حتى ولو لم يحدث إنقسام فعلي للخلية cytokinesis. يحدث الأنقسام النووي بدون إنقسام خلوي تحت ظروف معينة في بعض الكائنات مثل إنتـاج السابحـات الذكريـة zoospores في الكلاميدوموناس (الشكل ٩-٦).

نحن نعرف الآن أن النواة تحتوي على المعلومات التي تنظم نشأة ونشاط الخلية. والدليل من الأنقسام غير المباشر يوضح أن للكروموسومات دور هام في هذا الصدد. وعـلى ضوء ذلـك يمكن إعتبار الأنقسام بمثابة أداة للتضاعف المنظم (في الطور S) ولفصل (في الطور الأنفصالي) الكروموسومات وبالتالي المعلومات الوراثية. فكل خلية بنوية تتلقى مجموعة كاملة من الكروموسومات مطابقة تماما لما كان في الخلية الأم. وعلى ذلك يكون الأنقسام غير المباشر وسيلة لنقل هذه المعلومات بدون تغيير وبدون نقص من الخلية الأم إلى الخلايا البنوية.

كيف تستعمـل الكائنات الأنقسام غير المباشر؟ كل أنواع التكاثر اللاجنسي تتم بواسطة الانقسام غير المباشر وبالأضافة إلى ذلك فأن النمو والتجدد وإحلال الخلايا في



الشكل ٩-٦. دورة حياة الكلاميدوموناس. على الرغم من أن كل الأمشاج تبدو متشابهة فان مشيجين من نفس الخلية الأمية لايندمجان مع بعضهما.

الكائنات عديدة الخلايا يتم عن طريق الأنقسام غير المباشر.

٩-٣. طبيعة التاثر الجنسي

THE NATURE OF SEXUAL REPRODUCTION

في التكـاثـر الجنسي ينشأ الأفراد الجدد عن طريق إتحاد مجموعتين من المعلومات الوراثية (الحامض DNA). عادة تكون كل واحدة من هاتين المجموعتين موجودة داخل خلية متخصصة تسمى المشيج (أو الجاميطة) gamete وحتى يمكن جمع المعلومات الوراثية من هذين المشيجين لابد لهما أن يندمجا وهي عملية تعرف بالأخصاب fertiliza-tion وفي بعض الكائنات البسيطة مثل الطحلب الأخضر كلاميدوموناس لايمكن تمييز المشيجين عن بعضهما. مثل هذه الأمشاج التي يكون لها نفس المظهر تسمى بالأمشاج المتشابهة isogametes. تنقسم نواة وسيتوبلازم خلية كلاميدوموناس مفردة خمس أو ست مرات لتكوين ١٦ أو ٣٢ من الأمشاج المتشابهة وهذه ببساطة تكون صور مصغرة من

الكائن البالغ . ينفجر جدار الكائن البالغ وتتحرر منه الأمشاج ذات الأسواط في الماء المحيط به ثم تندمج مع الأمشاج الناتجة من خلية كلاميدوموناس أخرى ولا توجد إختلافات مرئية بين الأمشاج المندمجة (الشكل ٩-٦) ولكن الأمشاج الناتجة من نفس الخلية الأم لا تندمج مع بعضها.

في معظم الكائنات ينتج نوعان متميزان من الأمشاج . فالحيوانات المنوية sperm هي أمشاج ضئيلة وتكاد لاتزيد عن مجرد نواة وسوط والسوط يمكنها من السباحة . الحيوانات المنوية هي الأمشاج المذكرة . البيضة egg وهي المشيج المؤنث تكون أكبر وغير متحركة وتحتوي على كميات كبيرة من المواد الغذائية بالأضافة إلى النواة . ولأن الحيوان المنوي والبيضة مختلفان كثيرا فأنهما يسميان بالأمشاج المتباينة heterogametes. الناتج من الاخصاب هو الزيجوت zygote. والزيجوت الناتج من إتحاد مشيجين عادة يسمى البيضة المخصبة fertilized egg.

من أهم سمات التكاثر الجنسي أن الأمشاج المندمجة مع بعضها غالبا ما تنشأ من أفراد منفصلين . وعلى ذلك فأن فردين (هما الأبوان) يساهمان في تكوين النسل . فإذا كان هذان الأبوان مختلفين في أي ناحية من النواحي (و غالبا حتى إذا لم يكونا مختلفين كما سنرى) فان السلالة تظهر فيها تجمعات جديدة من الصفات . وفي مرات كثيرة تكون هذه التجمعات من الصفات في غير صالح السلالة وفي مرات كثيرة لايكون لها تأثير على من توجد به . وأحيانا ينتج عن هذه التجمعات الجديدة من الصفات فرد أكثر ملاءمة من أبويه للبيئة التي يعيش فيها . وهذا القسم الأخير هو الذي يسمح بتحسن النوع تدريجيا من الناحية التركيبية والوظيفية أي التطور evolution.

في كائنات عديدة يكون إنتاج الأمشاج المذكرة والمؤنثة من نفس الفرد . تسمى مثل هذه الأفراد خنثى hermaphorditic. دودة الأرض وبعض الأسماك وغالبية النباتات الزهرية هي أمثلة للكائنات الخنثى . وحتى في هذه الحالات عادة يسهم فردان في تكوين الزيجوت حيث يندمج الحيوان المنوي من أحد الأفراد مع بيضة من فرد آخر . وتكون النتيجة إخصاب خلطي cross-fertilization يعمل على زيادة التباين بين أفراد السلالة . وبعض الكائنات الخنثى مثل دودة الأرض لا يخصب الفرد بيضاتة مطلقا . وفي البعض الآخر مثل النباتات الزهرية تلجأ إلى الأخصاب الذاتي -self-fer

tilization فقط عندما يفشل حدوث الأخصاب الخلطى. في الباب (١٦) سوف ندرس الآليات التي تشجع حدوث الأخصاب الخلطى وتجنب الأخصاب الذاتي.

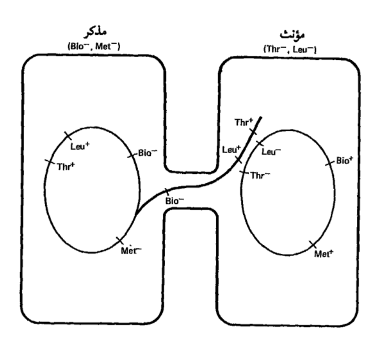
٩-٤ . التكاثر الجنسي في البكتريا

SEXUAL REPRODUCTION IN BACTERIA

جوهر التكاثر الجنسي إذن هو التحديث والتغيير والتباين. وقد يكون أفضل إيضاح لذلك هو العملية كما تحدث في بعض البكتريا. فقد ساد الأعتقاد لسنوات طويلة أن البكتريا تتكاثر بالأنشطار fission فقط ولم يكتشف أي دليل على حدوث التكاثر الجنسي بها حتى عام ١٩٤٧. في تلك السنة إكتشف ج. ليدربرج و. إي. ل. تاتم أن بكتريا القولون *E. coli* تستطيع أن تتكاثر جنسيا. وعلى الرغم من أنه لم يمكن ملاحظة الخلايا في حالة تزاوج فعليا إلا بعد ذلك ببعض الوقت إلا أن ليدربرج وتاتم حصلا على دليل قاطع (وإن كان غير مباشر) على حدوث التكاثر الجنسي.

والسلالة الـتي إستعملاها من *E. coli* لم يكن لها أي أفضليات من حيث مصـادر الغـذاء. فعنـد إمـدادهـا بالجلوكوز كمصدر للطاقة والكربون وبعض الأملاح غير العضوية كمصدر للنتروجين والكبريت والفوسفور لتخليق الأحماض الأمينية والأحماض النووية فانها تنمو بصورة جيدة. وفي داخل خلاياها الضئيلة تحتوي على كل الأنزيمات اللازمة لتحويل الجلوكوز والأملاح غير العضوية الى كل الجزيئات العضوية اللازمة للحياة.

مثـل كل البكـتريا فان *E. coli* حساسة جدا للتعرض للأشعة فوق البنفسجية. والجرعة متوسطة الثقل منها تكون قاتلة. وفي الحقيقة فان هذا هو السبب في أن لمبات الأشعة فوق البنفسجية تباع كلمبات قاتلة للجراثيم كي تستعمل في قتل البكتريا في غرف العمليات بالمستشفيات ومـا الى ذلـك. والجـرعـات القليلة من الأشعـة فوق البنفسجية قد لاتقتـل البكتريا ولكنها قد تحطم قدرتها على تكوين واحد أو أكثر من المركبات العضوية الهامة. ولذلك لابد من إضافة هذه المركبات الى غذاء البكتريا إذا كان لها أن تعيش. أضف الى ذلـك أن هذه الخسارة التخليقية تكون وراثية. فكل الذرية الناتجة من إنشطار هذه البكتريا ذات النقص الغذائي ستعاني من نفس هذا العجز.



الشكل ٩-٧. انتقال الجينات أثناء التزاوج في بكتيريا القولون. نسخة من كروموسوم الخلية المانحة يتم حقنها في الخلية المستقبلة فيمدها بالمعلومات الوراثية اللازمة لتخليق الثريونين والليوسين. هذا الكسب يمكن الخلية الآن من النمو على وسط غذائي يحتوي فقط على الجلوكوز والأملاح.

وقد تم تطوير سلالة من *E. coli* بواسطة الأشعة فوق البنفسجية تنقصها القدرة على تخليق أحد فيتامينات B (البيوتين bioton) وأحد الأحماض الأمينية وهو الميثيونين methionine (Bio^-, Met^- – الشكل ٩-٧). ولا بد من إضافة هاتين المادتين الى غذائها لكى تعيش. كما تم تطوير سلالة أخرى يمكنها تخليق البيوتين والميثيونين من الجلوكوز والأملاح ولكنها غير قادرة على تخليق الحامضين الأمينيين ثريونين threonine وليوسين leucine (Thr^-, Leu^-).

وإذا سمح لهاتين السلالتين من البكتريا بالأختلاط مع بعضهما بحرية ثم وضعتا في مزرعة تحتوي على الجلوكوز والأملاح فقط فان مستعمرات من الخلايا لاتلبث أن تظهر وتزدهر هذه الخلايا على الرغم من غياب الفيتامينات والأحماض الأمينية التي كانت تلزم لآبائها. والأكثر من ذلك أن الخلايا المنحدرة عنها تظل تعيش على الجلوكوز والأملاح فقط.

ماذا حدث؟ بطريقة أو بأخرى تمكن أفراد كل سلالة من توحيد صيغتهم الوراثية. أفراد السلالة الأولى بما لهم من صيغة خاصة بتكوين الانزيمات اللازمة لتخليق الثريونين والليوسين (وبقية المركبات العضوية ماعدا البيوتين والميثيونين) قد وحدت هذه الصيغة مع صيغة السلالة الثانية التي تضمنت التعليمات الخاصة بتكوين البيوتين

والميثيونين. وعلى ذلك تكون بكتريا قد نشأت تشبه السلالة الأصلية من حيث قدرتها على تلبيه كل إحتياجاتها بأستخدام الجلوكوز والأملاح فقط.

ويبين الدليل أن البكتريا من إحدى السلالات تحقن نسخة من كروموسومها الوحيد في خلية السلالة الأخرى عندما تتلامسان (الشكل ٩-٧).

لاحظ أن التكاثر الجنسي في هذا المثال قد إختـزل الى جوهره فقط. فلم تتكون أيه أمشاج وانما ببساطة تتصل خلية مؤقتاً بخلية أخرى تعطيها بعضا من صيغتها الوراثية. كذلك لم تنشأ بكتريا إضافيـة في هذه العملية وان كانت بكتريا جديدة قد ظهرت وهي قادرة على العيش تحت ظروف لايستطيع أبويها أن يعيشا فيها.

تبقى مشكلة. ففي التكاثر الجنسي في البكتريا تنتقل قطعة من الكروموسوم من خلية إلى أخـرى. وهذا الأنتقال غير متبادل ولذلك تكتسب إحدى الخليتين صيغة وراثية إجمالية أكبر ولابد أن يتبع ذلك التخلص من قدر مكافىء وإلا فانه بعد فترة من الزمـن سـوف يحـدث تراكم للمادة الكروموسومية في النوع. وغير معروف حتى الآن على وجـة اليقين كيف تستعيد الخلية البكترية محتواها الكروموسومي المعتاد. نفس المشكلة تواجه كائنات أخرى تتكاثر جنسيا ولكن الحل قد تم إكتشافه.

٩-٥. الأنقسام الأختزالي MEIOSIS

لكل نوع من الكائنات عدد مميز من الكـروموسومـات. فذبابة الفاكهة *Drosophia melanogaster* بها ٨ و البصـل به ١٦ والبشر ٤٦ (لئـلا تفـترض من ذلك أن عدد الكروموسومات في النوع مرتبط بالضرورة بدرجة التعقيد في الكائن يجب أن تلاحظ أن الجمبري به على الأقل ٢٠٠ كروموسوم في كل خلية). وجميع هذه الأعداد زوجية وهذا يعكس أن الكروموسومات توجد في أزواج متماثلة. الخلايا التي تحتوي على مجموعة كاملة من الأزواج المتماثلة توصف بأنها ثنائية العدد الكروموسومي diploid ويرمز لها بالرمز ٢ ن (2n).

يؤدي الإنقسـام غير المباشر الى تكوين خلايا لها نفس عدد الكروموسومات التي كانت موجـودة في الخلية الأم وهـذا يخلق المشاكل اذا كانت الخلايا الناتجة من هذا الأنقسـام ستعمـل كأمشاج. إذا إتحد حيوان منوي من البشر به ٤٦ كروموسوم مع

بويضـة بها ٤٦ كرومـوسوم سوف ينتج زيجوت به ٩٢ كروموسوم وهو ضعف العدد العادي بالنسبة للنوع. ونمو الزيجوت بواسطة الأنقسام غير المباشر سيؤدي الى خلايا بها هذا العدد الجديد. وتستطيع أن ترى بسهولة أنه بعد أجيال قليلة من هذا النوع سوف لايكون هناك مكان في الخلايا لغير الكروموسومات.

في الواقع لايحدث ذلك إلا نادراً في الكائنات الحية. عند نقطة معينة ما بين تكوين الـزيجوت وتكوين الأمشاج يحدث نوع خاص من الأنقسام الخلوي يسمى الأنقسام الأختزالي meiosis. يتكون الأنقسام الأختزالي من إنقسامين خلويين متتاليين بتضاعف واحد في الكروموسومات. وعلى ذلك فعندما تنقسم خلية إنقساما إختزاليا فانها تنتج أربع خلايا تحتوي كل منها على نصف العدد الزوجي من الكروموسومات. هذا العدد النصفي يسمى بالعدد الأحادي haploid أو ن (n). وإختزال عدد الكروموسومات ليس عملية عشوائية حيث لا يوجد في الخلايا الناتجة من الأنقسام الأختزالي إلا فرد واحد من كل زوج متـماثـل من الكـرومـوسـومـات التي كانت موجـودة في الخلية ثنائية العدد الكروموسومي. وعلى ذلك فعندما يتحد مشيجان فان الزيجوت الناتج (٢ ن) يتلقى فرد واحد من كل زوج من الأزواج المتماثلة من كل مشيج وبالتالي من كل أب.

يمكن تقسيم كل واحد من الأنقسامين الأختزالين الى عدة أطوار مشابهة لتلك التي تحدث في الأنقســام غير المبــاشر ومــع ذلـك فهنـاك إختـلافـات هامـة في سلوك الكروموسومات تحدث في الأنقسام الأول.

الطور التمهيدي الأول PROPHASE I

الطور التمهيدي للأنقسام الأختزالي الأول أبطأ بكثير مه في الأنقسام غير المباشر. علماء الخلية يقسمون الطور التمهيدي الأول الى خمس مراحل. أسماء هذه المراحل ومميزاتها الأساسية موجودة في الجدول المبين في الشكل ٩-٨ كما يوجد منظر تخطيطي لأحداث الأنقسام الأختزالي في الشكل ٩-٩.

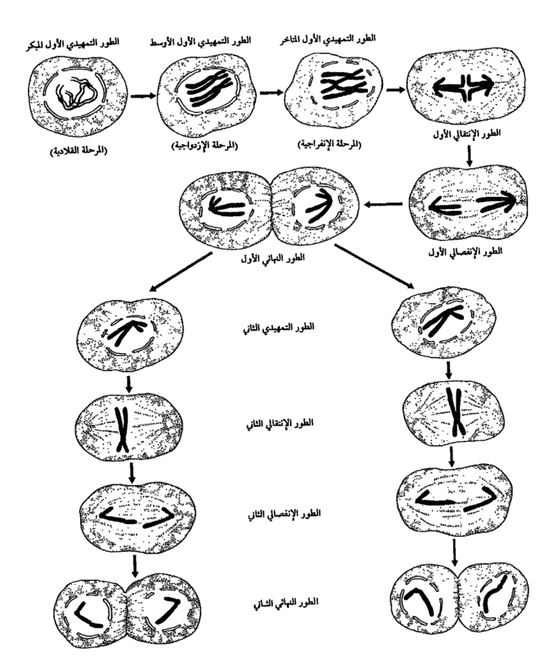
عندما يمكن مشاهدة الكروموسومات لأول مرة (المرحلة القلادية للطور التمهيدي الأول) يبدو كل كروموسوم كتركيب منفرد. ولكن كما يحدث في الأنقسام غير المباشر يكون معظـم - إن لـم يكـن كل - الحـامـض DNA الموجود بالخلية قد تضاعف في

الشكل ٩-٨. مراحل الطور التمهيدي في الإنقسام الإختزالي الأول.

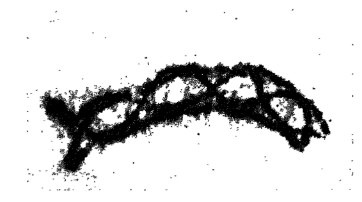
	المرحلـة		مميزاتهـا
١.	القلاديـة	Leptotene	تستطيل الكروموسومات وتبدو مفردة.
٢.	الازدواجيـة	Zygotene	الكروموسومات المتماثلة تزدوج لتكون (ن) من المثاني.
٣.	الضامـة	Pachytene	تقل المثاني في الطول.
٤.	الإنفراجيـة	Diplotene	الكروموسومات المتماثلة تتباعد قليلا فتبدو الكروموتيدات المنفصلة والتصالبات.
٥.	التشتتية	Diakinesis	تتباعد القطع المركزية للكروموسومات المتماثلة تستمر الكروماتيدات في القصر.

مرحلة S التي تسبق الطور التمهيدي الأول. ولذلك فأننا نستطيع أن تستنتج أن هذه التراكيب فعلا مزدوجة. وكلما تقدم الطور التمهيدي (المرحلة الأزدواجية والضامة) يأخذ كل كروموسوم في الأزدواج مع مثيلة وتسمى هذه العملية بالأزدواج pairing أو synapsis وهي من الصفات التي ينفرد بها الأنقسام الأختزالي حيث أنها لا تحدث في الأنقسام غير المباشر. أزواج الكروموسومات المتماثلة تسمى المثاني bivalents.

وبعد ذلك (في المرحلة الأنفراجية) يبدأ كل كروموسومين متماثلين في التباعد عن بعضهما وفي هذا الوقت تتضح حقيقة أن كل منهما يتكون من زوج من الكروماتيدات الأختية. وعلى ذلك يتكون كل مثاني من ٤ خيوط أو كروماتيدات. وتظل الخيوط الأربعة متصلة ببعضها بوسيلتين : (١) تظل الكروماتيدات الأختية لكل كروموسوم متصلة بواسطة القطعة المركزية و (٢) عند نقطة أو (عادة) عدة نقاط تكون كروماتيدات غير أختية متصلة ببعضها البعض. هذه النقاط تسمى التصالبات chiasmata وعند كل تصالب تكون الكروماتيدات غير الأختية قد تبادلت بعض القطع. عملية التبادل هذه تسمى بالعبور crossing over وهي عملية عكسية بمعنى أن الأجزاء التي تتبادلها الكروماتيدات غير الأختية تكون مثل بعضها تماما. في الشكل ٩-٩ يوجد زوج واحد فقط متماثل وعبور واحد فقط بينهما ومع ذلك غالبا يوجد عدد من التصالبات في المثاني الواحد (الشكل ٩-١٠).



الشكل ٩-٩. الانقسام الاختزالي. تكون الكروموسومات في المرحلتين القلادية والازدواجية مضاعفة على الرغم من أنها تبدو دائما تقريبا كخيوط مفردة في هاتين المرحلتين. ولكن يتم استنتاج أنها مضاعفة من تضاعف محتوي الخلية من الحامض DNA. للبساطة يبين الرسم زوج متماثل واحد من الكروموسومات أحد فردية باللون الأسود والأخر ملون. تصالب واحد فقط مرسوم على الرغم أنه غالبا ماتتكون عدة تصالبات.



الشكل ٩-١٠. خمس تصالبات في مثاني في المرحلة الانفراجية من الجراد الصغير. (بتصريح من بروفيسور برنارد جون - الجامعة الوطنية الاسترالية - كانبرا).

وعند تكوين إثنين أو ثلاثة أو أكثر من التصالبات فأنه قد يشمل أي خيط فإذا أخذت الخيوط (الكروماتيدات الأختية) الأرقام ١ و ٢ وأخذت خيوط مثيلة الأرقام ٣ و ٤ فإن المرء قد يجد في المثاني الواحد واحد أو أكثر من التجمعات ١-٣ و ٢-٣ و ١-٤ و٢-٤ وقد يظهر أي تجمع أكثر من مرة. الأحداث الوحيدة المستبعدة هي : (١) تكوين تصالبات بين كروماتيدات أختية (وهي غير ذات معنى على أي حال لأن تركيبها الوراثي واحد) و (٢) إنضمام أكثر من كروماتيدتين غير أختيتين عند أي نقطة على طول الكروموسوم (أي لا يمكن لثلاثة أو أربعة خيوط أن تتبادل أجزاءها عند نفس النقطة).

يختلف موقع وعدد التصالبات من كروموسوم إلى آخر ومن خلية إلى أخرى. (في البشر يكون متوسط عدد التصالبات لكل مثاني أكثر قليلا من ٢).

الطور الأنتقالي (أو الأستوائي) الأول METAPHASE I

يشبه الطور الأنتقالي الأول في الأنقسام الأختزالي الطور الأنتقالي في الأنقسام غير المباشر من حيث إختفاء غشاء النواة وظهور المغزل. ولكنه يختلف عنه في نقطة هامة. ففي الطور الأنتقالي الأول تتصل القطع المركزية لكل زوج متماثل بالمغزل إحداها فوق والأخرى تحت خط الأستواء.

الطور الأنفصالي الأول والطور النهائي الأول ANAPHASE I AND TELOPHASE I

مع بداية الطور الأنفصالي الأول تهاجر القطع المركزية لكل مثاني كل نحو القطب المقابل لها ويؤدي ذلك الى فصل المثاني الى «أنصاف مثاني» (الشكل ٩-٩). لاحظ أنه

لا يحدث هنا إنفصال القطع المركزية الذي وجدناه في الطور الأنفصالي للأنقسام غير المباشر. والذي حدث أن الكروموسومات المتماثلة هي التي إنفصلت. وعلى ذلك ينتج عن الطور النهائي خليتان بكل منها فرد واحد فقط من كل زوج متماثل كان موجودا في الخلية الأصلية (على الرغم من أن الكروموسومات المتماثلة الأصلية قد تبادلت قطعة أو أكثر من كروماتيداتها).

مرحلة ما بين الانقسامين INTERKINESIS

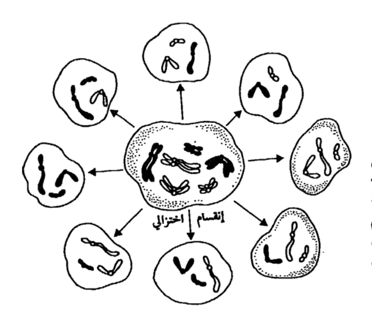
في بعض الكائنات لايفصل طور نهائي أو طور بيني بين الأنقسام الأختزالي الأول و الأنقسام الأختزالي الثاني فتذهب الخلية مباشرة من الطور الأنفصالي الأول الى الطور التمهيدي الثاني. ومع ذلك فحتى في الكائنات التي يوجد بها طور بيني يفصل بين الأنقسامين لا توجد مرحلة S ولا يحدث تخليق إضافي للحامض DNA.

الانقسام الثاني THE SECOND DIVISION

يشبه الانقسام الاختزالي الثاني الانقسام غير المباشر فما زالت الكروموسومات موجودة على هيئة مثاني وتتصل القطع المركزية بالمغزل وتترتب عند خط الأستواء في الطور الأنتقالي الثاني metaphase II . انفصال القطع المركزية للكروماتيدات الأختية في الطور الأنفصالي الثاني anaphase II يفصل الكروماتيدات وتنجذب كل منها نحو أحد القطبين (الشكل ٩-٩).

وبأكتمال الأنقسام الأختزالي الثاني تنتج أربع خلايا تحتوي كل منها على فرد واحد فقط من كل زوج متماثل من الكروموسومات التي كانت موجودة في الخلية الأصلية. هذه الخلايا تحتوي إذن على نصف عدد الكروموسومات الموجودة في الخلية الأم (أي العدد الأحادى للكروموسومات). وفي هذه الحالة المبسطة فأن خليتين من الخلايا الأربعة النـاتجـة تحويان كرومـوسـومـات أبوية أو أمية لم تتغير بينما الخليتان الباقيتان تحويان كروموسومات بها أجزاء أبوية وأجزاء أمية.

العبـور ليس هو الـطريقـة الوحيدة التي ينتج بها الأنقسام الأختزالي خلايا ذات كرومـوسـومـات متبـاينـة. في الشكـل ٩-٩ يوجـد زوج متـماثـل واحـد فقط من الكروموسومات لمجرد السهولة (٢ ن = ٢). وفي الغالبية العظمى من الكائنات يكون



الشكل ٩-١١. التوزيع العشوائي للكروموسومات الأمية (سوداء) والأبوية (ملونة) أثناء الانقسام الاختزالي في كائن عدده الثنائي من الكروموسومات هو ٦ (٢ ن = ٦).

العدد الثنائي أكبر من ذلك و غالبا أكبر بكثير. ولكن لنأخذ حالة أنثى بعوضة الكيولكس *Culex pipens* وهي من أكثر الأنواع إنتشارا. في هذه المخلوقات يكون العدد الثنائي ٦ وهذه الكروموسومات الست تكون ثلاثة أزواج متماثلة وعضو واحد من كل زوج جاء من البعوضة الأم (الكروموسومات الأمية m) وآخر جاء من البعوضة الأب (الكروموسومات الأبوية p). وعلى ذلك يمكننا أن نرمز للأزواج الكروموسومية الثلاثة على النحو الآتي: Am Ap, Bm Bp, Cm Cp. في الطور الأنتقالي الأول من الأنقسام الأختزالي ترتب الكروموسومات المتماثلة نفسها على جانبي خط الأستواء. فأذا رتبت الكروموسومات Am Bm Cm نفسها على أحد جانبي خط الأستواء ورتبت الكروموسومات Ap Bp Cp نفسها على الجانب الاخر فان الأمشاج ستكون مثل الأمشاج التي تلقتها البعوضة من أبويها (مع أهمال العبور). ولكن هناك ستة تجمعات أخرى لها نفس القدر من الاحتمال (الشكل ٩-١١). ذبابة الفاكهة *Drosophila melanogaster* بها كروموسومات أربعة أبوية وأربعة أمية وعند توزيع عضو من كل زوج متماثل على الأمشاج يكون هناك ١٦ تجمع محتمل للكروموسومات الأبوية والأمية في أزواج متماثلة. عدد الأنواع المختلفة من الأمشاج الناتجة من هذا التوزيع العشوائي random assortment للكروموسومات يساوى ٢^ن حيث ن هي العدد الأحادي للكروموسومات في الكائن. العدد الأحادى في الأباء والأمهات من البشر هو ٢٣ وكل

منهـا يمكنـه بالتـوزيع العشـوائي فقط إنتاج ٢^٢٣ أي ٨٣٨٨٦٠٨ نوع مختلف من الأمشاج. وعندما نذكر أن العبور قد حدث فيها بين كل من الكروموسومات الأبوية والكروموسومات الأمية في الأنقسام الأختزالي الأول لا يكون مستغربا أن ينعدم وجود شخصين متشابهين تماما على الأطلاق (الأستثناء الوحيـد هـو حالـة التوائـم المتماثلة identical twins ولكن هذا إستثناء ظاهري فقط لأنهم ينتجون من بويضة واحدة مخصبة).

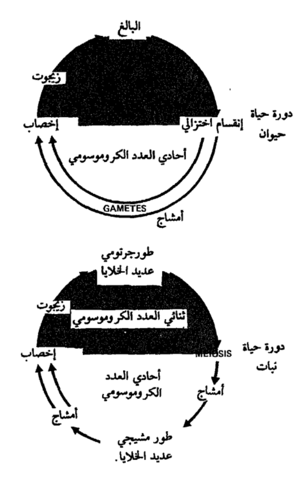
الأنقسام الأختزالي والتباين MEIOSIS AND VARIABILITY

ماهي إذن أهمية الأنقسام الأختزالي؟ أولا يختزل العدد الثنائي الى العدد الأحادي وهذا يفتح الطريق أمام إندماج مشيجين وبالتالي يوفر اليه الجمع بين صفات أبوين مختلفـين. ثانيا الأنقسـام الأختزالي يؤدي الى التباين في الأمشاج الناتجة من كل من

الأبوين. التوزيع العشوائي للكروموسومات الأبوية والأمية مضافا اليه عبور أجزاء من الكروموسومات الأبوية والكروموسومات الأمية تجعل من المحتمل عدم وجود مشيجين متشابهين تماما حتى من نفس الأب.

كيف تستخدم الكائنات الحية الأنقسام الأختزالي؟ عرفنا ضرورة حدوث الأنقسام الأختـزالي بين الأخصـاب وتكـوين الأمشـاج في الكـائنات التي تتكاثر جنسيا. في الحيوانات يؤدي الأنقسام الأختزالي مباشرة الى إنتاج الأمشاج (الشكل ٩-١٢). أما في الفـطريات والـطحـالب فان الإنقسـام الأختـزالى قد يحدث مبـاشرة بعد تكوين الزيجوت. الزيجوت الذين يتكون من إندماج مشيجين في الكلاميدوناس يحيط نفسه بجدار سميك ويكمن وعندما تصبح الظروف مواتية ينقسم الزيجوت إختزاليا وينتج أربـع سابحـات ذكـرية zoospores أحـادية العدد الكروموسومي (الشكل ٩-٦). وعندما تتحرر تنمو بسرعة لتكوين خلايا كلاميدوموناس كاملة الحجم. وبذلك يقضى هذا الكائن معظم دورة حياته في الحالة أحادية العدد الكروموسومي. وفي النباتات أيضـا يستعمـل الأنقسـام الأختـزالي في إنتـاج الأبواغ أو الجراثيم spores ولا تنتج الأمشاج منها إلا في مرحلة لاحقة (الشكل ٩-١٢).

حدوث الأنقسـام الأختـزالي قبـل تكـوين الأمشـاج بوقت طويل في العديد من



الشكل ٩-١٢. دورة حياة نموذجية لحيوان وأخرى لنبات. ينتج الانقسام الاختزالي في النبات جراثيم تنمو كل منها لتعطى طور مشيجي gametophyte أحادي العدد الكروموسومي. هذا هو الطور الرئيسي في دورة حياة بعض النباتات (مثل الحزازيات) ولكنه يكون تركيب ضئيل في البعض الاخر (مثل النباتات الزهرية). وفي كل الحالات ينتج الطور المشيجي الأمشاج بالانقسام الاختزالي وهي التي تقوم بالتكاثر الجنسي تفاصيل اكثر عن دورة حياة النباتات في الباب ١٦.

الكائنات يوضح نقطتين إضافيتين حول إنقسام الخلية. الأولى هي أن الأنقسام غير المباشر يمكن أن يحدث في الخلايا أحادية العدد الصبغي كما يحدث في الخلايا ثنائية العدد الصبغى. الثانية هي أن العدد الأحادى من الكروموسومات يكفى للتحكم في وظائف الخلية في هذه الكائنات (ولكن ليس في كثير من الحيوانات) وأن العودة الى الحالة ثنائية العدد الكروموسومي بالأخصاب توفر ببساطة مجموعة مزدوجة من المعلومات الوراثية. هذه المجموعة المزدوجة تضع الأساس لأعادة تنظيم المعلومات الوراثية في الأنقسام الأختزالي التالي. مرة أخرى نرى أن التكاثر الجنسي يؤدي وظيفة أساسية : احداث التباين في أفراد النوع.

سبق أن أشرنا في هذا الباب الى أن التكاثر اللاجنسي عادة يؤدي الى نسل هونسخة طبق الأصل من الآباء أما التكاثر الجنسي فقد وصفناه بأنه طريقة إنجاب نسل له صفات مخالفة لصفات الآباء ومن ثم يؤدي الى التباين في أفراد النوع. فاذا إفترضنا أن

المعلومـات التي تتحكم في ظهور صفات الكائن تكون موجودة على الكروموسومات يكون من السهل أن نرى كيف يحقق الأنقسام غير المباشر الهدف الأول وكيف يحقق الأنقسام الأختزالي الهدف الثاني بعد أن يتلوه الأخصاب. طوال هذا الباب كنا نتحدث عن الصيغ الـوراثية الموجودة في أنوية الخلايا. واحد من أنشط مجالات البحوث في العلوم الأحيائية يختص بطبيعة وأداء هذه الصيغ الوراثية. هذه الدراسة تسمى الوراثة وهي موضوع الأبواب الخمس التالية.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

يكـون النسل الناتج من التكاثر اللاجنسي مماثل وراثيا للأب المفرد وهذا النسل يكون جماعة. التكاثر اللاجنسي يتم بواسطة الأنقسام غير المباشر.

في الأنقسام غير المباشر يتضاعف كل كروموسوم في الخلية (أثناء المرحلة S من دورة الخلية) وتذهب مجموعة كروموسومات كاملة الى كل من النواتين البنويتين. غالبا تنقسم الخلية الأم في نفس الوقت – عملية تسمى الانقسام الخلوي – وتتلقى كل من الخليتين البنوتين إحدى النواتين المتماثلتين الناتجتين من الانقسام غير المباشر. يحدث الانقسام غير المبـاشر للنـواة في أربعـة أطـوار هي الـطور التمهيدي والطور الانتقالي والطور الانفصالي والطور النهائي.

في التكـاثـر الجنسي يسهم أبـوان في المعلومـات الوراثية التي يتلقاها النسل. في الكـائنات حقيقية النواة يساهم كل من الأبوين بمجموعة من الكروموسومات أثناء عملية الأخصاب. ومن أجل ألا تحتوي خلايا النسل على ضعفي عدد الكروموسومات الموجودة في آبائهم فأنه لابد من إختزال عدد الكروموسومات التي سوف تستعمل في الأخصـاب الى النصف. يحدث ذلـك بعملية الأنقسام الأختزالي. يتكون الأنقسام الأختـزالي من عمليتـين متتـاليتين من الإنقسام النووي هما الأنقسام الأختزالي الأول والأنقسـام الأختزالي الثاني بتضاعف واحد في عدد الكروموسومات. تحتوي الخلايا الأربعـة النـاتجة من الأنقسام الأختزالي على نصف عدد الكروموسومات الموجودة في الخلايا الأبوية ويكون كل نوع من الكروموسومات ممثلا فيها بكروموسوم واحد. تلجأ الحيوانات الى الأنقسام الإختزالي لتكوين الحيوانات المنوية وتلجأ اليه النباتات لتكوين الجراثيم أو الأبواغ.

يسهم الأنقسـام الأختزالي في حدوث التباين الوراثي وهو العلامة المميزة للتكاثر الجنسي بثـلاث طرق: (١) بأختزال عدد الكروموسومات الى النصف وذلك يسمح بحـدوث الأخصـاب وبـالتـالي تجمـع جينات من أبوين و (٢) بالتوزيع العشوائي لكروموسومات متماثلة أبوية وأمية أثناء الأنقسام الأختزالي الأول و (٣) بإعادة التجميع المتبادل لقطع من الكروموسومات الأبوية والأمية المتماثلة أثناء العبور.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ العــدد الأحـادي من كرومـوسـومـات الحصـان زائـد العـدد الأحـادي من كروموسومات الحمار يمكن أن ينجبا بغلا سليما. البغل عقيم. ومع إستثناءات نادرة (أنظر السؤال التالي) لايمكنه التزاوج مع بغل أخر أو حصان أو حمار. هل يمكنـك أن تشرح لماذا يحدث ذلـك على أساس سلوك الكروموسومات أثناء الأنقسام الأختزالي؟

٢ ــ على الرغم من أن البغل عقيم بصفة عامة إلا أن هناك حالات قليلة لأناث البغل ولدت حصان (بعد التزاوج مع حصان) أو بغل أخر (بعد التزاوج مع حمـار). مستخـدمـا معلوماتـك عن الأنقسـام الأختزالي هـل يمكنـك تفسير هـذه الأحـداث النادرة؟

٣ ــ كيف يختلف سلوك الكـروموسومات في الأنقسام غير المباشر عنه في الأنقسام الأختزالي الأول؟

٤ ــ التكاثر اللاجنسي يحفظ الأمور كما هي أما التكاثر الجنسي فيشجع على التغير صف كيف يجعل الأنقسام غير المباشر الحالة الأولى ممكنة وكيف يجعل الأنقسام الأختزالي متبوعا بالأخصاب الحالة الثانية ممكنة.

٥ ــ إشـرح لماذا يحتوي الوسط الغذائي لنمو *E. coli* على حد أدنى من :

(أ) الجلوكوز أو أحد الكربوهيدرات الأخرى (ب) أول فوسفات البوتاسيوم.
(ج) كبريتات المغنيسيوم. (د) نترات الأمونيوم.

٦ ــ اذا قام كائن خنثوي باخصاب بويضاته فهل لابد أن يكون كل أفراد النسل متشابهين؟ إشرح

٧ ـ كم عدد أنواع الأمشاج التي يمكن أن ينتجها البصل (٢ ن = ١٦) بالتوزيع العشوائي فقط؟

REFERENCES المراجع

1. JOHN, B., and K. R. LEWIS, Somatic Cell Division. Oxford Biology Readers, No. 26, Oxford University Press, Oxford, 1972. Mostly about mitosis.
2. MAZIA, D., "The Cell Cycle, "Scientific American, Offprint No. 1288, January, 1974.
3. PATT, D. I., and GAIL R. PATT, An Introduction to Modern Genetics, Addison - Wesley, Reading, Mass., 1975. Chapter 10 discusses bacterial conjugation and other mechanisms of sexual reproduction in bacteria.
4. JOHN, B., and K. R. LEWIS, The Meiotic Mechanism Oxford Biology Readers, No.65, Oxford University Press, Oxford, 1973.

القسم الرابع PART IV

الـوراثـة GENETICS

التـزاوج في بكـتريـا القولـون : *E.coli*

يتم إنتقـال الجينات من الخلية المانحة (أسفل) إلى الخلية المستقبلة بعد أن تكونا قد إتصلتا بقناة تشبه الخيط الرفيع. (صورة بالمجهر الإليكتروني أعدتها جوديث كارناهان وتشارلز برنتون ومأخوذة عن ر. واي. ستانير وم. دودوروف و إي. أ. أدرلبرج: عالم الميكروبات الطبعة الثالثة - ١٩٧٠. بتصريح من برنتس هول - إنجلوود كليفس - نيو جرسي).



الباب العاشر

الوراثــة : عمل منــدل

حينما تتكاثر الكائنات الحية لاجنسيا فإن النسل ينشأ في صورة نسخ طبق الأصل من الأبوين طالما أنه يعيش تحت نفس الظروف. وفي المقابل عندما تتكاثر الكائنات الحية جنسيا فإن صفات أفراد النسل تكون مختلفة فيما بينها كما تختلف عن صفات كل من الأبـوين. عندما يتزاوج كلبان من الكولـي collie والـراعـي الألمـاني German shepherd فإن النسل يكون من الكلاب وليس من أي نوع أخر من الحيوانات ومع ذلك فإن هذا النسل لايشبه الكولي ولا يشبة الراعي الألماني تماما. وقبل أن يكتشف علماء الأحياء كثيراً من الحقائق حول الانقسام غير المباشر والانقسام الاختزالي حاولوا إكتشاف قواعد، قد تفسر كيف تكون الصفات المرئية للنسل مرتبطة بصفات الآباء وآباء الآباء.

من بين النـظريات العـديدة التي وضعت لتفسير توارث الصفات هناك نظريتان تستحقـان التنويـه. إحداهما (وهي نظريـة مندل Mendel) كانت بمثابة الأساس الذي بنيت عليه كل الدراسات اللاحقة في علم الوراثة. أمّا النظرية الأخرى (و هي نظرية توارث الصفـات المكتسبة) فقد فشلت عند إختبارها علمياً ومع ذلك ظل لها مؤيدوها والمدافعون عنها.

١٠-١. نظرية توارث الصفات المكتسبة THE THEORY OF THE INHERITANCE OF ACQUIRED CHARACTERS

تقول هذه النظرية ببساطة أن الصفات التي يكتسبها الآباء في حياتهم تنتقل إلى نسلهـم. عادة ترتبـط هذه النظرية باسـم لامارك Lamarck وهو عالم أحياء فرنسي



CHAPTER 10 الباب العاشر

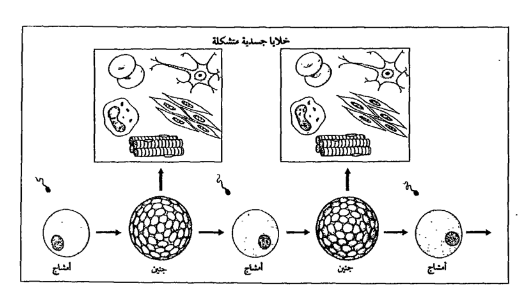
الوراثة : عمل مندل
GENETICS : THE WORK OF MENDEL

إستعمل هذه النظرية في محاولة تفسير مظاهر التأقلم العديدة في النباتات والحيوانات مع البيئة. وكان أشهر مثال لتوضيح ذلك هو الزرافة حيث إدعى أن الرقبة الطويلة قد تطورت نتيجة مد الرقاب في عدة أجيال للتغذية على أوراق الأشجار. وقد نقل كل جيل الزيادة القليلة التي حدثت في طول الرقبة الى نسله.

هل هنـاك أي دليل على أن هذه الـظاهرة تحدث؟ على الرغم من عدة محاولات لإثبات أن التغيرات الجسمية التي يكتسبها أحد الأفراد تنتقل إلى نسله فلم يتم إكتشاف أي دليل على ذلك. التجارب الأولى التي حاولت حسم المسألة كانت هي تلك التي يستـأصـل فيها جزء من الجسم جراحياً مثل ذيل الفأر. وحتى بعد عدة أجيال من إستئصال الذيل فإن الفئران الصغيرة كانت تولد بذيل له نفس الطول. وفي الواقع لم يكن على القائمين بهذه التجارب إلا أن ينظروا حولهم بحثاً عن تأكيد لنتائجهم فإن مربي الأغنام قد دأبوا على إستئصال ذيولها لأجيال يصعب حصرها ولكن العملية لابد أن تتكـرر مـع كل جيـل جـديد. وحتى عندما إستعملت وسائل أكثر تقدماً لتغيير الوراثة بتغيير البيئة فإنها لم تفلح.

لماذا؟ من أجل أن تنتقل التغيـرات التي تحدث في الجسم إلى النسل فإنه لابد لها من أن تنخرط في الحيوانات المنوية والبويضات وهما الرابطتان الوحيدتان بين أجسام الآباء و أجسـام الأبنـاء. ربـما يحدث هذا الشيء إذا نتجت الأمشـاج من بعض الخـلايا المتخصصة في الجسم والتي يكون قد طرأ عليها بعض التغيير ولكن هذه الخلايا لاتنتج أمشاجا. وقد عرف لسنوات طويلة أن خلايا الجسم المنتجة للأمشاج في الحيوانات تبعد جانباً منذ المراحل الجنينية المبكرة جداً. في الواقع فإن طفلة حديثة الولادة تكون بعض خلاياها قد وضعت جانباً وبدأت الانقسام الاختزالي لكل خلية سوف تصير يوماً ما بويضة ناضجة.

وقـد عبر عالم الأحياء الألماني وايزمان عن هذه الأفكار في شكل نظريـة إستمرار الجرمبلازم continuity of germplasm. طبقاً لهذه النظريـة فإن الكائنات عديـدة الخلايا تتكـون مـن خلايا منتجـة للأمشاج هي الجرمبلازم germplasm وخلايا بقية الجسـم أو السـومـابلازم somaplasm. و قد إعتبر وايزمان أن خلايا الجرمبلازم لاتموت لأنها سلسلة لاتنكسر من الأمشاج والأجنة تعود الى فجر الحياة (الشكل ١٠-١). وعند كل جيل فإن الجنين الذي ينمو من الزيجوت لايدخر بعض الجرمبلازم لإنجاب الجيل التالي



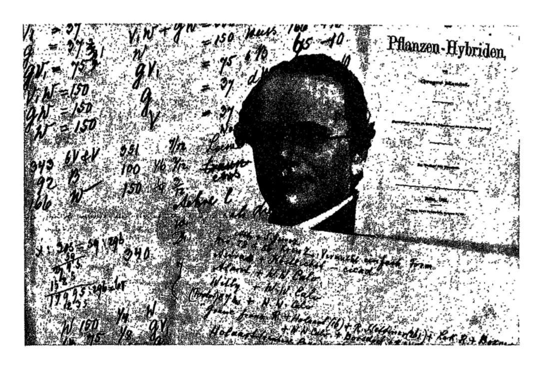
الشكـل ١٠-١. افتراض وازيهان بينها هو صحيح بالنسبة لغالبية الحيوانات فانه لاينطبق على النباتات. فالنباتات تستطيع انتاج خلايا منتجة للأمشاج من خلايا جسدية متشكلة.

فحسب وإنـما ينتـج أيضاً الخلايا التي سيتكون منها الجسم أي السومابلازم الخاص بالكائن نفسه. من هذه الناحية فإن السومابلازم يكون مجرد منزل لسكنى الجرمبلازم يضمن له الحماية والتغذية والوصول الى جرمبلازم الجنس الآخر كي يبدأ الجيل التالي. ولا تشكل الحجج القديمة من جاء أولاً البيضة أم الدجاجة أي مشكلة لوايزمان ففي رأيه أن الدجاجة ليست إلا وسيلة البيضة لوضع بيضة جديدة.

ظهـر صـدق نظريـة وايـزمـان بجـلاء علـى الأمـريكـيـان و. إي. كاسـل وجـون سـي. فيليبـس فـي عـام ١٩٠٩. فقـد إستأصـلا المبايـض مـن فـأر تجارب أشقـر albino guinea pig ووضعا في مكانها مبايض من فأر تجارب أسود. ثم تزاوج الفـأر الأشقـر مع ذكـر أشقـر وبـدلاً من أن يأتي النسـل أشقر كما هو متوقع كانت الفئـران الصغيرة سوداء (التزاوج بين فأر أشقر و آخر أسود ينتج دائما نسلاً أسود). الصيغ الوراثية في البويضات لم تتغير حتى مع إكتمال نضجها في جسم حيوان مختلف.

١٠-٢. نظرية مندل: الخلفية
MENDEL'S THEORY : THE BACKGROUND

نظرياتنـا الحـالية عن الـوراثة صاغها الراهب النمساوي جريجور مندل (الشكل



الشكل ١٠-٢. جريجور مندل (١٨٨٢ - ١٨٨٤) والصفحة الأولى من البحث الذي نشر أعماله فيه وبعض ملاحظاته على الوراثة والتهجين في النباتات (الصور بتصريح من بروفيسور فيرني جرانت).

١٠-٢). من عام ١٨٥٨ وحتى عام ١٨٦٦ عمل مندل في حديقة الدير بمدينة برون (بـرنو الأن) في تزاوج نباتات بسلة الزهور ودراسة النسل الناتج من هذه الزيجات. فالنبـات شديد التحمل وسريع النمو وكما في كثير من القرنيات (أو البقوليات) فإن بتلات الزهرة تضم أعضاء التكاثر بداخلها تماماً. هذه الأعضاء هي الأسدية stamens التـي تنتج حبـوب اللقـاح pollen (حامل الأمشاج المذكرة) والمتاع pistil الذي ينتج الأمشاج المؤنثة أي البويضات. على الرغم من أن الحشرات تنفذ أحياناً إلى الأعضاء الجنسية إلا أن الإخصاب الذاتي هو القاعدة. وقد وجد مندل أنه بإمكانه فتح براعم الأزهار والتخلص من الأسدية قبل نضجها ثم لجأ إلى تعفير المتاع بحبوب اللقاح من زهرة أخرى لإحداث التلقيح الخلطي بينهما.

كان إختيار بسلة الزهور إختياراً موفقاً أيضاً لأن هناك أصناف تختلف عن بعضها بصورة محددة. فبعضها كان ينتج بعد التجفيف بذور مجعدة بينما كان البعض الأخر ينتج بذور ملساء مستديرة. والبعض كان ينتج بذور بها فلقات خضر (وهي أعضاء

تخزين الغـذاء - أنظر الشكل ١٦-٩) أما البعض الآخر فكان ينتج بذور صفراء، البعض ينتـج قروناً خضراء والبعض ينتج قروناً صفراء، البعض ينتج أزهاراً بيضاء والبعض ينتـج أزهاراً حمراء. هذه الصفات الثنائية (وثلاث صفات أخرى) إختارها مندل للدراسة لأنه كان يسهل تمييزها ولأنها كانت حقيقية التوارث جيلاً بعد جيل أي أنه طالما حافظ على التلقيح الذاتي فإن هذه الأصناف ظلت تنتج نسلاً مماثلاً للآباء في الصفات المدروسة.

كانت هنـاك صفـات أخرى تختلف في أصناف بسلة الزهور مثل حجم الأوراق وحجم الأزهار. وقد تجنب مندل هذه الصفات بحكمة لأنها ببساطة لم تكن ضمن التصنيف المحـدد «إمـا هذا وإمـا ذاك». فنباتات مندل من بسلة الزهور كانت لها إما بذور مستديرة وإمَّا بذور مجعدة وليست بينها حالات وسط. وفي المقابل فإن حجم الأوراق وحجم الأزهار كان الاختلاف فيه يغطي مدى واسع ولم يكن هناك مجرد فئتين يمكن وضعهما فيهما. لذلك كان قرار مندل بقصر مجال تجاربه هكذا عاملاً مهماً في نجاحه.

١٠-٣. تجارب مندل MENDEL'S EXPERIMENTS

فـي إحـدى تجاربـه الأولـى قـام منـدل بتلقيـح خلطـي بيـن صنـف لـه بـذور مستديـرة round و آخـر بـذوره مجعـدة wrinkled هـذا الجيل الأبوى يسمى الجيل P (parental) حيث تم تعفير المتاع في الصنف ذي البذور المجعدة بحبوب لقاح من أسدية الصنف ذي البذور المستديرة. والتلقيح العكسي تم أيضاً حيث وضعت حبوب لقاح من أسدية الصنف ذي البذور المجعدة على مبايض الصنف ذي البذور المستديرة. في كلتا الحالتين كانت كل البذور الناتجة من الأزهار الملقحة خلطياً مستديرة. لم يكن هناك بذور لها شكل وسط (شكل البذور ولون الأزهار كانت صفات مجزية بصفة خاصة في الدراسة فكان يمكن تحديد الشكل في نفس الموسم الذي تم فيه الاخصاب والبذور كانت هي الجيل التالي. شكل القرن وطول الساق ولون الزهرة في الجيل الثاني لم تتحدد إلا في الموسم التالي بعد أن تكون البذور قد أنبتت وتحولت الى نباتات بالغة). سمى مندل الجيل الثاني بالجيل الهجين لأنه نتج عن أبوين غير متشابهين. وكذلك يسمى الجيل البنوي الأول أو جيل F1.

إستنبت مندل كل البذور المستديرة من الجيل F1 ونمـت لتعطى **٢٥٣** نبات بالغ

من الجيل F1 وقد سمح لأزهار الجيل F1 بالإخصاب الذاتي بالطريقة المألوفة . أي أن مندل في الواقع كان يهجن الجيل F1 (أو الجيل الهجين) مع نفسه . من قرون هذه النباتات حصل مندل على **٧٣٢٤** بذرة هي بذور الجيل F2 كان من بينها **٥٤٧٤** بذرة مستديرة و **١٨٥٠** بذرة مجعدة أي بنسبة **٢,٩٦** بذرة مستديرة لكل بذرة مجعدة .

استنبت مندل بعضاً من هذين النوعين من بذور الجيل F2 . من البذور المجعدة حصل على نباتات تنتج (بالإخصاب الذاتي) محصولاً من نباتات الجيل F3 وكانت بلا إستثناء من النوع المجعد . من البذور المستديرة حصل على **٥٦٥** نبات وسمح لهم بانتاج محصول الجيل F3 بالاخصاب الذاتي . في هذه الحالة كان نتاج **١٩٣** من النباتات فقط بذوراً مستديرة . أما النباتات الباقية وعددها **٣٧٢** فقد أنتجت بذواً مجعدة بنسبة **٣** : ١ (الشكل ١٠-٣) .

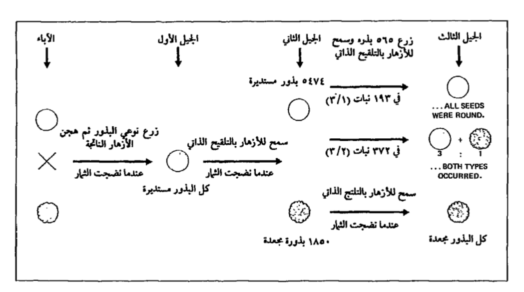
ما هي أهمية هذه الحقائق؟ من الواضح أنه عند تهجين بسلة مستديرة البذور مع بسلة مجعدة البذور فإن الأولى تنقل الى النسل في الجيل الأول F1 عاملاً مسيطراً . كما أنه لايهم إن كان العامل الخاص بإستدارة البذور يأتي من الأمشاج المذكرة أو من الأمشاج المؤنثة فالنتيجة واحدة في كلتا الحالتين .

عودة البذورة المجعدة الى الظهور في الجيل F2 لاتعني إلا أن بعض النباتات على الأقل من الجيل الأول F1 كانت تحمل العامل الخاص بتجعد البذور ولو أن وجوده كان مستتراً في أفراد الجيل الأول . الصفات التي تنتقل بدون تغير إلى الجيل الأول (مثل إستدارة البذور) تسمى سائدة dominant بينما التي تختفي في الجيل الأول ثم تعاود الظهور في الجيل الثاني F2 (مثل تجعد البذور) تسمى متنحية recessive.

١٠-٤ . إفتراض مندل MENDEL'S HYPOTHESIS

في محاولة لتفسير هذه الحقائق وضع مندل إفتراضات . هذه الإفتراضات لم تكن ملاحظات ولم تكن حقائق وإنما هي عبارات إن صحت لكان فيها تفسير للنتائج المشاهدة . هذه الإفراضات هي :

١ — في كل كائن يوجد عاملان يتحكمان في ظهور صفة ما (نحن نسمي هذه العوامل الآن بالجينات أو المورثات genes).



الشكل ١٠-٣. نتائج مندل.

٢ ـ يحصل الكائن على هذين العاملين من أبوية. عامل من كل أب.

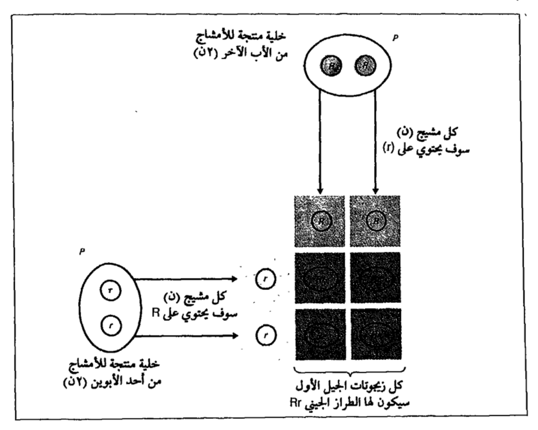
٣ ـ ينتقل كل واحد من هذه العوامل كوحدة متكاملة لا تتغير. (البذور المجعدة في الجيل الثاني F2 لا تقل تجعداً عن بذور جيل الآباء على الرغم من مرور العوامل المتحكمـة فـي هـذه الصفة خلال الجيل الأول F1 مستدير البذور).

٤ ـ عنـد تكـوين الخلايا التكاثرية (الحيوان المنوي أو البويضة) تنفصل العوامل وتتوزع كوحدات على الأمشاج. هذه العبارة غالباً ما تسمى القانون الأول لمندل Mendel's first law أو قانـون الانعزال The law of segregation.

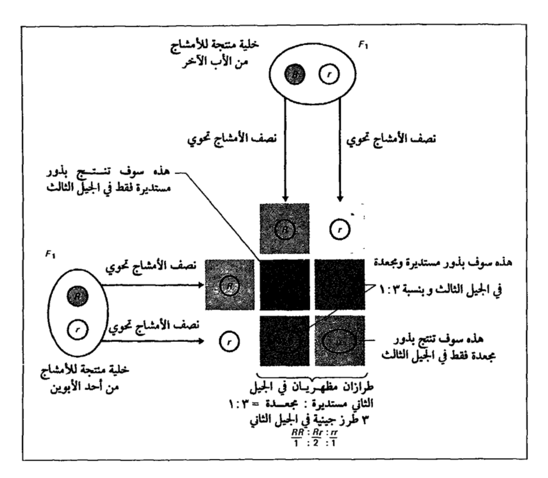
٥ ـ إذا كان الكائن يحتوي على عاملين *غير متشابهين* لصفة ما يتم التعبير عن أحدهما مع الاسبعـاد التام للآخر. ونحن الآن نستعمل لفظ الصفة المضادة لوصف إحدى صورتي الجين الذي يتحكم في صفة ما. وعلى ذلك يكون هناك صفتان متضادتان (إستدارة البذور وتجعد البذور) من الجين الذي يتحكم في شكل البذور.

إلى أي حد يحسن هذا الافتراض تفسير الحقائق المشاهدة؟ تبعاً لخطة مندل فإن نباتات جيل الآباء P مستديرة البذور كان بها ٢ من الجينات المتماثلة ويمكن أن نرمز لها بالحرفين RR أمَّا النباتات مجعدة البذورة فقد إحتوت على ٢ من جينات تجعد البذور هما rr واليوم نصف كل واحد من نباتات جيل الآباء P بأنـه متشابـه اللاحـقـة homozyg-

ous بالنسبة لهذه الصفة. أثناء تكوين الأمشاج تنفصل الجينات وحيث أن الجينات متشابهة في كل نبات فان أمشاج النبات الواحد تكون متشابهة. فنواة أي حيوان منوي أو بويضة من النبات مستدير البذور سوف تحمل الجين R وبالمثل فإن أي مشيج من النبات مجعد البذور سوف يحمل الجين r. النوع الوحيد المحتمل للزيجوتات الناتجة من تهجين هذين الصنفين سيكون Rr وعلى ذلك فإن كل خلايا النبات من الجيل الأول F1 ستحتوي على واحد من كل نوع من هذين الجينين المتضادين. واليوم نقول أن النبات من الجيل الأول F1 هو متباين اللاحقة heterozygous. جميع بذور الجيل الأول ستكون مستديرة حسب إفتراض مندل لأنه في حالة تباين اللاحقة يتم التعبير عن الجين R مع الحجب الكامل للجين r بعبارة أخرى فإن R سائد على r. ويمكن التعبير عن هذا التهجين بما يسمى مربع بونيت Punnett's square (الشكل ١٠-٤).



الشكل ١٠-٤. كيفية تفسير افتراض مندل لنتائج التهجين بين نبات بسلة نقي بذوره مجعدة مع نبات بسلة نقي بذوره مستديرة.



الشكل ١٠-٥ . كيفية تفسير افتراض مندل لنتائج تزاوج نباتات الجيل الأول F_1.

عندما تتكون الأمشاج في نباتات الجيل الأول تنفصل مرة أخرى الجينات المتضادة حيث لا ينتقل الى المشيج إلا أحد الجينين المتضادين. هذا يعني أن نصف العدد الكلي للأمشاج الناتجة سوف يحتوي على الجين R والنصف الآخر سوف يحتوي على الجين r. عندما يسمح لهذه الأمشاج بالإندماج عشوائياً فإن نصف عدد الزيجوتات تقريباً سوف يكون متباين اللاحقة والربع سيكون متشابه اللاحقة في الجين r (الشكل ١٠-٥). وعلى ذلك يكون هناك ثلاثة تجمعات محتملة (RR, Rr, rr) والنسبة المتوقعة هي ١ : ٢ : ١ ولكن بسبب سيادة R على r فليس هناك وسيلة للتمييز بالنظر بين بذور تحتوي على RR وأخرى تحتوي على Rr فكلاهما تكون مستديرة. واليوم نقول أن لهما نفس الطراز المظهري phenotype أي المظهر بالنسبة لصفة معينة. ومع ذلك فإن لهما طراز جيني genotype مختلف أي محتوى جيني فعلى لهذه الصفة. وهذا يفسر النتائج

المثيرة التي حصل عليها مندل عندما إستنبت الجيل الثالث. فقد كانت جميع البذور المجعدة حقيقية التوارث true bred وثلث البذور المستديرة (١٩٣) كانت أيضا حقيقية التوارث مما يشير إلى أنها كانت متشابهة اللاحقة سائدة RR أمَّا الباقي (٣٧٢) من البذور المستديرة فقد أنتجت بذوراً مستديرة وبذوراً مجعدة بنسبة ٣ : ١ تماماً كما في حالة الجيل الثاني. وبالتالي فإنها لابد أن تكون متباينة اللاحقة.

من المهم أن ندرك أن هذه النسب تقريبية فقط فعدد حبوب اللقاح الناتجة أكثر بكثير ممَّا يستعمل في الإخصاب وكذلك قد لا يتم إخصاب الكثير من البويضات أبداً. وعلى ذلك فإن المرء لايتوقع أن تنتج أربع عمليات إخصاب من الجيل الأول دائماً 1RR : 2Rr : 1rr. ولكن كلما زاد حجم العينة كلما تضاءلت فرص الإبتعاد عن النسب المتوقعة نظرياً. الشكل ١٠-٦ يبين الأعداد الفعلية للبذور المستديرة والمجعدة التي أنتجتها عشرة من بين ٢٥٣ نبات من الجيل الأول في تجارب مندل.

الشكل ١٠-٦. الانتاج الفعلي للبذور بواسطة كل من عشرة من نباتات الجيل الأول في تجارب مندل. لاحظ أن النباتات المفردة تنحرف بعيداً عن النسبة المتوقعة ٣ : ١ ولكن المجموعة ككل تقترب كثيراً من النسبة.

	مستديرة	مجعدة
١	٤٥	١٢
٢	٢٧	٨
٣	٢٤	٧
٤	١٩	١٦
٥	٣٢	١١
٦	٢٦	٦
٧	٨٨	٢٤
٨	٢٢	١٠
٩	٢٨	٦
١٠	٢٥	٧
المجموع	٣٦٦	١٠٧

في حالات عديدة تكون النسبة بعيدة عن النسبة المتوقعة ٣ : ١ ولكن عند جمع عدد بذور جميع النباتات فإن النسبة (١٤ , ٣ : ٣) تكون قريبة جداً من المتوقع.

١٠-٥ . كيفية الحكم على الإفتراضات
HOW HYPOTHESIS ARE JUDGED

إفتراضات مندل تعطي تفسيراً معقولاً لنتائج تجاربه في التهجين. وعلى الرغم من أنها ليست الأسلوب الوحيد الذي يمكن به تفسير هذه النتائج إلا أنها أبسط أسلوب فكـر فيه الإنسـان حتى الآن. وليس بوسعنـا أن نسـأل إن كانت إفتراضات مندل صحيحة، وكل ما يمكن أن نقوله أنها تعطى تفسيراً كافيا لكل الحقائق المشاهدة، وأنها أبسط تفسير لها. الألفاظ «معقولة» و «كافي» و «أبسط» لايسهل قياسها. والإفتراضات خاصة في المراحل الأولى لظهورها تقيِّم غالباً بمثل هذه الألفاظ. وفي النظرة العامة فإن العلماء يحيون حياة موضوعية تامة وعندما يتناولون الحقائق فإن ذلك يكون صحيحاً بصفة عامة ولكن عند تناولهم للافتراضات فإنهم عادة ما ينساقون وراء إعتبارات غير موضـوعية بل وعـاطفية أيضاً. وقد سار فكر مندل في هذه الحالة من أعداد الأنواع المختلفـة من البـذور الى التعميمـات التـي تفسر الحقـائـق أي التـي تجعل العقل يتقبلها. ونحن نسمي هذا النوع من الفكر بالفكـر البـنَّـاء inductive. لاتوجد قواعد منطقية بسيطة يمكن أن تقود في هذا الإتجاة لأن المرء يحتاج إلى الفطرة وعمق النظر. والقدرة على هذا التفكير البنَّاء تحتاج الى فن أكثر مما تحتاج الى علم ولكن العلم لايستمر بدونها.

هنـاك شرط أخر لابد أن يتوفر لأي إفتراض جيد. فينبغي له أن يهيىء الفرصة للتنبـوء بحقـائق جديدة. هذا التنبـوء بحقائق جديدة يشتمل على ما نسمية بالفكر الاستنباطي deductive فإذا صحت التعميمات فإنه يمكن إستنباط توابع محددة لها.

١٠-٦ . التلقيح الاختباري : إختبار لإفتراض مندل
THE TESTCROSS: A TEST OF MENDEL'S HYPOTHESIS

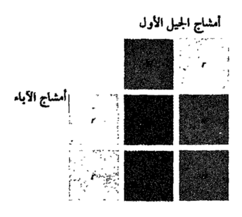
شعر مندل تماماً بأهمية هذه الخطوة. ولكي يختبر إفتراضه حاول التنبؤ بنتيجة تجربة تهجين لم يقم بإجرائها من قبل. فقد هجن نباتات بسلة الزهور متباينة اللاحقة وذات

البذور المستديرة (Rr) مع نباتات متشابهة اللاحقة بذورها معجدة (rr). وقد فكر في أن الأب متشابه اللاحقة المتنحي لايستطيع إنتاج إلا أمشاج بها r أمَّا الأب متباين اللاحقة فينبغي أن ينتج أعـداداً متساوية من أمشاج R وأمشاج r وقد تنبـأ منـدل بأن نصــف البـذور النـاتجـة من هذا التهجـين تكـون مستـديـرة (Rr) ونصفهـا الآخـر تكـون معجـدة (rr) (الشكل ١٠-٧). هذا النوع من التزاوج الذي يكون فيه أحد الأبوين معلومـًا ومتشـابه اللاحقـة متنحي يسمـى التلقيح الإختبـاري testcross فهو يختبر تلك الحـالات التي ينتج فيها طرازان جينيان (مثل RR و Rr) مختلفان نفس الطراز المظهري. لاحظ أنه بالنسبة للمشاهد العادي في حديقة الدير لايبدو هذا التهجين مختلفاً عن تهجين جيل الآباء P الذي سبق وصفه حيث كانت نباتات بسلة مستديرة البـذور تهجن مع نبـاتات بسلة مجعدة البذور. ولكن مندل في إعتقاده بأن النباتات مستـديرة البـذور في هذا التهجين متباينة اللاحقة تنبأ بأن البذور المستديرة والبذور المجعدة سوف يكون إنتاجها بنسبة ٥٠ : ٥٠ وقد قام فعلاً بالتهجين وجمع ١٠٦ من البذور المستديرة و ١٠١ من البذور المجعدة.

فسر إفتراض مندل كل الحقائق المعروفة وقاد إلى التنبؤ بحقائق أخرى لم تكن قد إكتشفت بعد. وعندما تم إكتشاف هذه الحقائق التي سبق التنبؤ بها قوي إفتراض مندل كثيراً. والإفتراض الذي يفسر كل الحقائق المعروفة وينجح في التنبوء بحقائق جديدة يسمى نظرية theory وإذا إستمرت نظرية في أداء الوظيفة التفسيرية والوظيفة التنبوئية فإنها في النهاية قد تسمى قانون law. إثنان من إفتراضات مندل (ناقشنا واحداً منهما حتى الآن) يعرفان الآن بقوانين مندل.

١٠-٧. الهجن الثنائية - قانون التوزيع المستقل
DIHYBRIDS - THE LAW OF INDEPENDENT ASSORTMENT

في نفس الوقت الذي كان مندل يدرس فيه توارث إستدارة وتجعد البذور قام أيضاً بإجـراء تجارب مشابهة على أصناف بسلة مختلفة في ست صفات أخرى محددة. وقد أيَّدت نتائج كل هذه التجارب الأخرى إفتراضه. بعد ذلك قام بتهجين نباتات بسلة تختلف عن بعضها في صفتين. فقد لقح خلطياً صنفاً حقيقي التوارث بذوره مستديرة وفلقاته صفراء بصنف آخر حقيقي التوارث بذوره مجعدة وفلقاته خضراء. وكانت كل

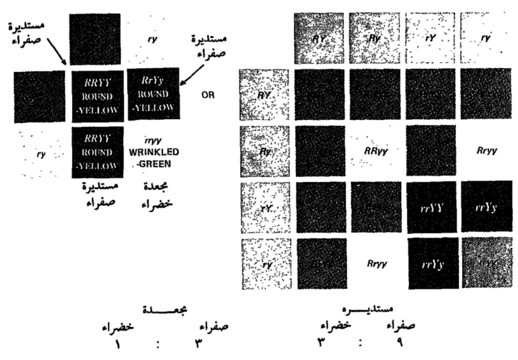


الشكـل ١٠-٧. التلقيـح الاختبـاري الذي أجـراه منـدل. على الرغم من أنه يشبه سطحيا التهجينات الأبوية السابقة الا أن تنبؤ مندل بانتاج طرازين مظهريين قد تأكد.

البذور الناتجة من هذا التزاوج مستديرة وكانت كل الفلقات صفراء. وقد أكد ذلك ما توصل اليه مندل سابقاً من أن الجين الخاص بإصفرار الفلقات (مثل الجين الخاص باستدارة البذور) كان سائداً. (هذا الجيل الأول يسمى هجين ثنائي dihybrid لأنه ينتج من تهجين أبوين يختلفان في صفتين). ثم أنبت مندل هذه البذور وسمح للأزهار النـاتجـة بالتلقيح الـذاتي. ويمكن توقـع أحد إحتمالين. فالجينات الخاصة بالشكل المستدير وإصفرار الفلقات الموروثة من أحد الأبوين قد لا تكون قابلة للإنفصال عن بعضهـا وبـذلك تنتقل كوحدة واحدة إلى الجيل الثاني وإذا صح ذلك أيضاً بالنسبة للجينـات الخاصة بالتجعد والإخضرار فإن المرء يتوقع أن تكون ثلاثة أرباع نباتات الجيل الثـاني ذات بذور مستـديرة وفلقـات صفراء بينما يكون الربع ذو بذور مجعدة وفلقات خضراء (الشكل ١٠-٨).

أمـا إذا كانت الجينـات الخاصة بشكل البذور ولون الفلقات تتوزع مستقلة عن بعضها البعض على الأمشاج فإن المرء يتوقع أن يجد في الجيل الثاني بذوراً مستديرة لها فلقات خضراء وبذوراً مجعدة ذات فلقات صفراء بالاضافة إلى تلك التي تشبه بذور الآباء. وحسب هذا الإفتراض الأخير فإن هذا التهجين يؤدي إلى إنتاج أربعة طرز مظهرية بنسبة ٩ : ٣ : ٣ : ١ ، (الشكل ١٠-٨).

قام مندل بإجراء هذا التهجين وحصل على ٣١٥ بذرة مستديرة ذات فلقات صفراء و١٠١ بذرة مجعدة فلقاتها صفراء و١٠٨ بذرة مستديرة فلقاتها خضراء و ٣٢ بذرة مجعدة فلقاتها خضراء. ومن ميزات العمل الدقيق لمندل أنه قام بعد ذلك بانبات كل هذه البذور ليتأكد من وجود ٤ طرز جينية منفصلة بين البذور المستديرة الصفراء وطرازين



الشكل ١٠-٨. تنبؤات بديلة بنتائج التهجين بين هجينين ثنائيين. في هذه الحالة كان التنبؤ الثاني (الى اليمين) صحيحا.

جينيين بين كلٍ من البذور ذات التجمعات الجديدة من الصفات ولم يكن هناك إلا البذور (٣٢) المجعدة الخضراء ذات طراز جيني واحد. قادت هذه النتائج مندل إلى صياغة الإفتراض الأخير (أو القانون الثاني لمندل) : توزيع زوج من العوامل يكـون مستقـلاً عـن توزيـع الـزوج الآخـر. وقـد سمـى هـذا فيمـا بعـد بقانـون التوزيع المستقل Law of independent assortment.

١٠-٨. ماتلى نظرية مندل MENDEL'S THEORY : THE SEQUEL

تم إجراء التجارب السابقة فيما بين عامي ١٨٥٨ و ١٨٦٦ وقد نشر مندل النتائج وتحليله لها في عام ١٨٦٦ ولم تلفت إلا القليل من إنتباه علماء الأحياء ولم يحاول أحد إعادة إجراء أي من هذه التجارب على صفات أخرى في كائنات أخرى. وقد ترك مندل هذه التجارب بسبب مشاغله المتزايدة في إدارة الدير.

توفي مندل في عام ١٨٨٤، وفي عام ١٩٠٠ أي بعد نشر نتائجة بأربعة وثلاثين عاماً أعيد إكتشاف عمله. فقد إكتشف ثلاثة علماء يعملون بمعزل عن بعضهم البعض

تماماً نفس المباديء التي وصفناها ولم يكتشفوا أن هناك راهباً مغمورا قد سبقهم في ذلك بحوالي ثلث قرن إلا بعد أن كانوا قد أتموا تجاربهم.

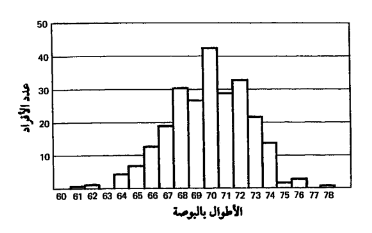
قدم البعض كثيراً من الأسباب لفشل أعمال مندل في أن تحوز على القبول ولكن مهما كانت الأسبـاب فإن هذه الأعمال لم تفشل في ذلك. ومن المفارقات أن يبدأ التاريخ لتطور علم الوراثة في العام ١٩٠٠ وليس في عام ١٨٦٦. لقد فشل عمل مندل في أن يصبح جزءاً من عالم العلم في أيامه، ولكن عندما أصبح العلماء مستعدون لمتابعة ما توصل اليه مندل، فقد أعادوا إكتشافه مرة ثانية.

ما هو وضع قوانين مندل اليوم؟ على الرغم من إكتشاف بعض الإستثناءات الهامة إلا أنها مازالت تشكل الأساس الذي يقوم عليه علم الوراثة.

١٠-٩. التباين المستمر : إفتراض تعدد العوامل CONTINUOUS VARIATION: THE MULTIPLE-FACTOR HYPOTHESIS

نشـأ أحـد هذه الاستثنـاءات من دراسـة توارث صفـات تختلف كمياً في الأفراد المختلفة. وكان مندل قد حصر دراسته على الصفات التي تتباين بصورة قاطعة ويسهل تمييزها أي بصورة كيفية. ولكن الرجال ليسوا إمّا طوالاً أو قصاراً فقط كما أنهم ليسوا ثقالاً أو خفاف الوزن فقط. فهناك صفات عديدة يكون التباين ففيها كمياً في عشيرة من العشـائـر (الشكـل ١٠-٩). وبعض هذا التبـاين يمكن تفسـيره على أسـاس إختلافات في التغذية أو ربما عوامل بيئية أخرى. ولكن البيئة ليست كافية لتفسير المدى الكامل من التباين في الأطوال والأوزان. ولا تكون أي نظرية عن الوراثة تامة النجاح حتى تجد تفسيراً لمثل هذا النوع من التباين.

بحلول عام ١٩٠٨ تجمعت المعلومات التي قادت الى حلٍ للمشكلة. فقد درس عالم الوراثة السويدي نيلسون ـ أيل توارث لون الحبوب في القمح. وباستعمال طرق مندل تـم تهجين سلالة نقية حمراء الحبوب مع سلالة نقية بيضاء الحبوب وكانت الحبوب حمراء في جميع أفراد النسل تقريباً، إلا أن شدة اللون كانت أقل بكثير مما في الحبوب الحمـراء للأب، وقـد بدا أن تأثيـر الجين الخـاص باحمـرار اللـون قد تم تعديلـه بوجـود الجين الخاص باللون الأبيض في أفراد الجيل الأول. هذه الظاهرة التـي لـم تحدث في دراسات مندل تسمى السيـادة الناقصـة incomplete dominance.

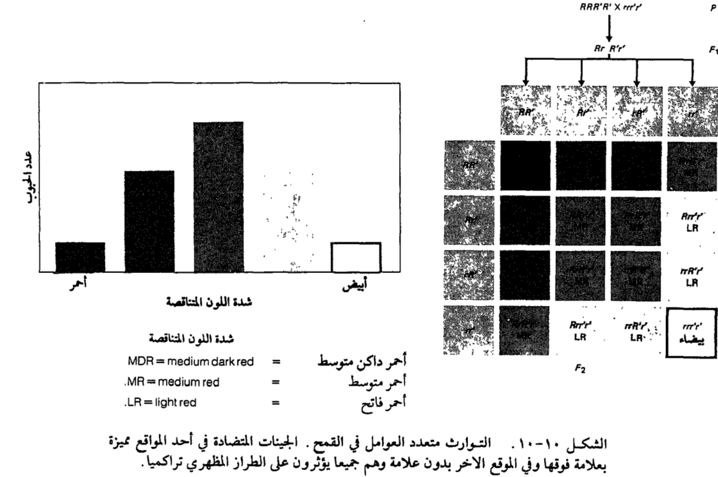


الشكل ١٠-٩. رسم بياني يوضح توزيع الأطوال بين مجموعة من الذكور في مدرسة ثانوية.

عندما زَاوَجَ نيلسون ـ أيل بين نباتين من الجيل الأول، حصل على الجيل الثاني، وفيه كانت نسبة النباتات حمراء الحبوب إلى النباتات بيضاء الحبوب هي ١٥ : ١، ولكن الفحص الدقيق أوضح أن الحبوب الحمراء ليست جميعاً متشابهة، وكان من السهل فصلها إلى أربعة مجموعات مختلفة. كان ١٥/١ منهم أحمراً داكن مثل الأب، وكان ١٥/٤ أحمراً فاتح. أمكن تفسير هذه النتائج بوضع إفتراض مؤداه أن لون الحبوب في القمح لايتحكم فيه زوج واحد، ولكن زوجان من الجينات يتراكم تأثيرهما دون سيادة ملحوظة، (الشكل ١٠-١٠). عند وجود أربعة جينات للون الأحمر ينتج لون أحمر داكن، وعند وجود أربعة جينات للون الأبيض تكون الحبوب بيضاء، بينما وجود واحد فقط من جينات الاحمرار الأربعة ينتج لون أحمر فاتح، ووجود أي إثنين من الأربعة يعطي حبوباً ذات لون أحمر متوسط، أما وجود ثلاثة من الجينات الأربعة فينتج حبوباً ذات لون أحمر داكن متوسط. إذا رسمنا رسما بيانيا يوضح أعداد النسل في الجيل الثاني مع شدة اللون تحصل على رسم يشبه ذلك الموضح في الشكل ١٠ـ ١٠.

في أصناف قمح أخرى وجد نيلسون ـ إيل النسبة بين الحبوب الحمراء والحبوب البيضاء في الجيل الثاني ٦٣ : ١ ويمكن تفسير ذلك بافتراض أن هناك ثلاثة أزواج من الجينات المتضادة تتحكم في اللون. في هذه الحالات أمكن التعرف على ست درجات من اللون الأحمر (حاول أن تحسب بنفسك الوراثة في هذا التهجين). كانت إختلافات اللون طفيفة للغاية. وقد سببت عوامل البيئة كذلك إختلافات في شدة اللون بحيث إتخذت الحبوب مدى مستمرا من كل درجات اللون بين الأحمر الداكن والأبيض.

وجود تباين مستمر في صفة إذن يمكن تفسيره بافتراض وجود عدة أزواج من الجينات



الشكـل ١٠-١٠. التـوارث متعدد العوامل في القمح. الجينات المتضادة في أحد المواقع مميزة بعلامة فوقها وفي الموقع الاخر بدون علامة وهم جميعا يؤثرون على الطراز المظهري تراكميا.

التي تتحكم في هذه الصفـة وأن تأثـيرها يتراكم. هذا الافتراض يسمى إفتراض العـوامـل المتعـددة multiple-factor hypothesis (ويسمى أيضـا نظرية التـوارث عديد الجينات theory of polygenic inheritance). وهي تقول أن:

(١) عندما تتزاوج أنواع متطرفة (مثل AABB, aabb) يكون النسل وسطاً بينها.

(٢) عندما تتزاوج أنواع وسيطة تكون غالبية النسل وسطاً بينها أيضاً ولكن تنتج كذلك أنواع متطرفة.

(٣) نتائج التزاوج العشوائي في عشائر كبيرة تكون على هيئة مدى واسع من الأنواع وتكون أكبر الأعداد في المدى المتوسط وأقلها تكون متطرفة.

هذه التـأثـيرات يمكن ملاحـظتهـا بالفعـل في أغلب حالات التباين الكمي في الكائنات الحية.

عندما قام مندل بتجاربة في الوراثة لم تكن طبيعة النواة والكروموسومات والانقسام الاختزالي مفهومة وعندما صاغ فكرة الجينات لم يحاول وصفها على أنها كيانات طبيعية أو أن يقول بدقة أين توجد في الأمشاج. بالنسبة لمندل كانت الجينات كيانات إفتراضية تفسر الأنماط الوراثية المشاهدة. وعندما أعاد علماء الأحياء إكتشاف أعماله سارعوا إلى ربط سلوك جيناته مع الظواهر المرئية في الخلية وتشكل جهودهم موضوع الباب التالي.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تتحكم كيانـات محددة تسمى الجينـات في الصفـات المرئية (الـطراز المظهري) للكـائن. في الكائنات ثنائية العدد الكروموسومي يتحكم زوج واحد على الأقل من الجينات في كل صفة من صفات الطراز المظهري ويكون كل فرد من هذا الزوج موروثا من أحد الأبوين. إذا إختلف أفراد الزوج في تأثيرهم الدقيق على الطراز المظهري فإنهم يسمون الجينات المتضادة. الجينات المتضادة هي أشكال بديلة لجين واحد مثل الجين الذي يتحكم في لون البذور في البسلة.

الكائن الذي يوجد به زوج من الجينات المتماثلة لصفة ما يسمى متشابه اللاقحة بالنسبة لهذين الجينين، أما ذلك الذي يوجد به جينين مختلفين فيسمى متباين اللاقحة. في الكائنات متباينة اللاقحة قد يتم التعبير عن أحد الجينات (سائد) وعدم ظهور الآخر

بالكامل أو قد يتأثر الطراز المظهري بكلا الجينين معاً (السيادة الناقصة).

عند تكوين الأمشاج (الجراثيم في النباتات) بالإنقسام الاختزالي تنفصل أزواج الجينات وتتوزع منفردة في كل مشيج (أو جرثومة) (قانون الانعزال لمندل).

وجد مندل أن توارث زوج من الجينات يكون مستقلاً تماماً عن توارث أي زوج آخر (قانون التوزيع المستقل). وكما سنري حالاً فان هذا صحيح فقط عندما يكون زوجا الجينات المعنيين على كروموسومات مختلفة أو متباعدين تماماً على نفس الكروموسوم.

بعض الصفات يكون التحكم فيها بواسطة أكثر من زوج واحد من الجينات هذا التوارث متعدد الجينات أو عديد العوامل يميز الصفات التي تميل إلى التباين المستمر من أحد النقيضين إلى الآخر (مثل وزن الجسم) بحيث يكون لغالبية الأفراد طراز مظهري بين النقيضين.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ ما هي الألفاظ التي إستعملها وايزمان للتمييز بين خلايا جسم الحيوان وخلاياه التناسلية.

٢ ــ هل تنطبق هذه الألفاظ بنفس الدرجة على البكتريا؟ وعلى النباتات؟

٣ ــ صف المحتوي الجيني للأنواع المختلفة من بويضات امرأة لها طراز جيني Kk Ll.

٤ ــ هل صحيح أن نقول إن تهجين نباتي بسلة متبايني اللاقحة أزهارهما حمراء سوف ينتج ٨ بذور، إثنتان منها متشابهة اللاقحة لهذه الصفة ؟ إشرح.

٥ ــ الجين الخاص بالطول في البسلة سائد بالنسبة لجين التقزم. وقد أنتج التهجين بين نبات طويل ونبات قزم ٨٦ نباتاً طويلاً و ٨١ نباتاً قزماً. ماهو الطراز الجيني المحتمل للنبات الطويل؟ وماذا يسمى هذا النوع من التهجين؟

٦ ــ ميز بين الحقيقة والافتراض. هل يمكن دائماً التمييز بينهما؟

٧ ــ في ذبابة الفاكهة اللون البني للعين متنحي بالنسبة للون الأحمر والجناح المنحني متنحي بالنسبة للجناح المستقيم. فإذا تم تهجين بين ذبابة نقية عيونها بنية وجناحها مستقيم وذبابة ذات عيون حمراء وجناح منحني ماذا تكون الطرز المظهرية في الجيل الأول؟ وإذا سمح لذبابتين من الجيل الأول بالتزاوج فما هي

الطرز المظهرية للجيل الثاني؟ وبأي نسبة؟

٨ ــ كم عدد الطرز الجينية المختلفة في الجيل الثاني في السؤال رقم ٧؟

٩ ــ عند تهجين النبات (أ) نقي طويل، مع النبات (ب) نقي قصير، جاء كل أفراد النسل متوسطي الطول. وعند إجراء التهجين بين إثنين من هذا النسل كان ١/١٦ من الجيل التالي بنفس طول الجد الطويل. كيف تفسر ذلك؟

١٠ ــ عرف الجين؟

المراجع REFERENCES

1- CASTLE, W. E., and J.C. PHILLIPS, " Successful Ovarian Transplantation in the Guinea-Pig, and its Bearing on Problems of Genetics," Great Experiments in Biology, ed. by M.L. Gabriel and S. Fogel, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1955. A brief report of their experiment.

2- MENDEL, G., Experiments in Plant Hybridization, Classic Papers in Genetics ed. by James A. Peters, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1959. A clear Presentation of Mendel's experiments and his interpretation of his results.

CHAPTER 11 الباب الحادي عشر

GENES ON CHROMOSOMES جينات على كروموسومات



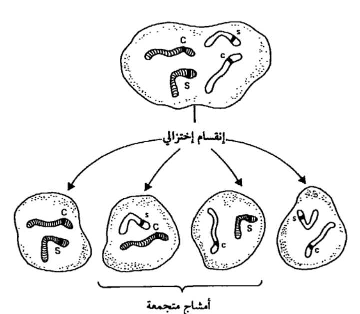
الباب الحادي عشر

جينات على كروموسومات

في الأعوام التي أغفلت فيها إكتشافات مندل حدثت إكتشافات عديدة وهامة في مجال علم الخلية cytology فقد إتضحت أهمية النواة في الهيمنة على صفات الكائن بواسطة دراسات بوفري على بويضات قنفذ البحر والتي نوقشت في الباب رقم ٥ كذلك تم إكتشاف سلوك الكروموسومات في الانقسام غير المباشر والانقسام الاختزالي.

١١-١ . السلوك المتوازي للجينات والكروموسومات PARALLEL BEHAVIOUR OF GENES AND CHROMOSOMES

بعد إعادة إكتشاف قوانين مندل بقليل توصل العديد من الباحثين ومنهم هـ. إي. ساتون وبوفري نفسه إلى أن بعض قواعد مندل يمكن تفسيرها إذا كانت الجينات موجودة على أو في الكروموسومات. وقد سبق لمندل أن قال أن الجينات توجد في أزواج ويأتي كل فرد منها من أحد الأبوين. والكروموسومات أيضا توجد في أزواج يأتي كل فرد منها من أحد الأبوين. وقد قال مندل أنه عند إنتاج الخلايا التناسلية تنفصل العوامل (أو الجينات) المزدوجة وتتوزع كوحدات على كل مشيج (قانون الأنعزال). في الأنقسام الأختزالي تنفصل الأزواج المتماثلة من الكروموسومات ويذهب فرد واحد فقط من كل زوج إلى إحدى الخلايا الجنسية. وقال مندل كذلك أنه عند تهجين الهجن الثنائية فأن توزيع زوج واحد من العوامل يكون مستقلا عن توزيع الزوج الآخر (قانون التوزيع المستقل). وفي الإنقسام الإختزالي يكون توزيع الكروموسومات الأبوية والكروموسومات الأمية عشوائيا بالكامل. فاذا إفترضنا أن جينات إحدى الصفات



الشكــل ١١-١. اعـادة توزيـع الجينـات كنتيجـة للتـوزيـع الـعشـوائي للكـرومـوسـومـات اثنـاء الانقسـام الاختزالي. المكان الــذي يشـغـله الجــين في الكروموسوم يسمى الموقع. فاذا كانت مواقع الجينات في فرد متبـاين اللاحقة مزدوج (كـما هو مبــين هنـا) على كرومـوسـومـات مختلفة فان التــوزيــع العشـوائي لهذه الكروموسومات سوف يؤدي الى انتـاج الأنـواع الأربعـة المحـتـمـلة من تجمعـات الجينات وبأعداد متساوية.

ولتكن شكـل البـذرة موجودة على زوج واحد من الكروموسومات بينما تكون جينات الصفــة الأخــرى (لـون الفلقـات) على زوج آخـر فان التـوزيع المستقـل لأزواج الكروموسومات سيؤدي أيضا الى التوزيع المستقل للصفتين (الشكل ١١-١).

وحيث أنه يوجد بالكائن جينات أكثر بكثير مما يوجد به من الكروموسومات فأنه لابد أن يحتـوي كل كرومـوسـوم على العديد من الجينات. موضع وجود جين معين على الكـروموسوم يسمى الموقع (أو المكان) Locus. ويفترض أن الجينين المتحكمين في صفة ما يشغلان موقعين متقابلين على الزوج المتماثل من الكروموسومات.

اذا زاوجنـا بين هجينـين ثنـائيين كانت الجينات المتحكمة في صفتيهما على نفس الكروموسوم فهل تتوقع أن يظل قانون مندل للتوزيع المستقل متماسكا؟ سوف نرى لاحقا في هذا الباب أن هذا القانون لاينطبق على الهجن الثنائية من هذا النوع. وبدلا من ذلك توصف الجينات بأن بينها إرتباط Linkage.

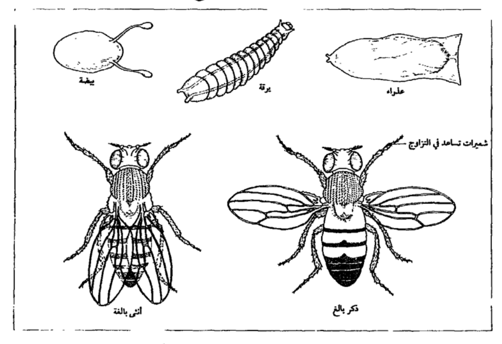
ومن أجـل الأيضـاح المباشر لمصداقية النظرية الكروموسومية كان من الضروري الربط بين وجود أو غياب صفة ما أو مجموعة من الصفات مع وجود أو غياب كروموسوم معـين في الخـلايا الجسـدية للكـائن. ولكن الجينين المتحكمين في التعبير عن صفة

ما موجودان على موقعين متقابلين في زوج متماثل من الكروموسومات حسب النظرية الكـروموسـومية وقـد تكـون الكـروموسومات المتماثلة سهلة التمييز بالنظر عن بقية الكروموسومات في الخلية ولكن لايمكن التمييز بينها وبين بعضها . ولذلك فانه لايمكن معرفة ماذا كان أحد كروموسومات زوج متماثل يحمل جينا معينا أم لا بمجرد الفحص البصري .

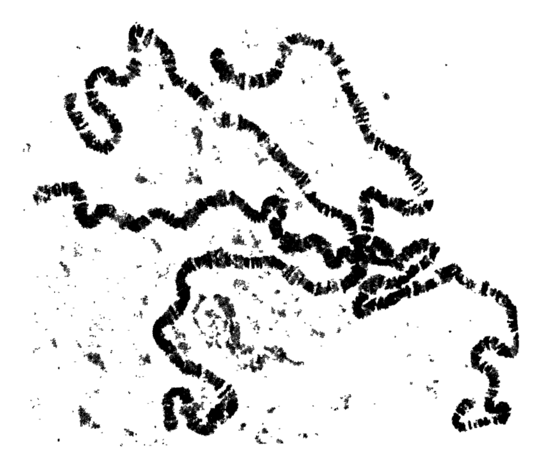
إختبارات النظرية الكروموسومية TESTS OF THE CHROMOSOME THEORY

١١-٢ . تحديد الجنس SEX DETERMINATION

جـاء أول حـل لهـذه المشكلـة مـن دراسـات تمـت علـى ذبابـة الفاكهـة *Drosophila melanogaster* (الشكـل ١١-٢) . كان تومـاس هاردي مورجـان رائـد إستعمال هذا الكائن الضئيل في البحوث الوراثية وكان هذا إختيارا رائعا لعدة أسباب . أولا أن الـذبـابـات ضئيلة الحجم وبـذلك يمكن تربية عشائر كبيرة منها في المختبر بسهولة . ثانيا أن دورة حياتها تتم بسرعة حيث يمكن إنتاج جيل جديد من ذبابات بالغة كل أسبوعين . وثالثا أن الأناث خصيبة جداً إذ تضع الأنثى عدة مئات من البيضات



الشكل ١١-٢ . بعض مراحل تطور ذبابة الفاكهة .



الشكـل ١١-٣. كرومـوسـومـات عمـلاقـة من الغـدد اللعـابيـة في ذبابة الفاكهة. مثل هذه الكروموسومات توجد في خلايا أخرى ضخمة ونشيطة (بتصريح من ب. ب. كاوفمان).

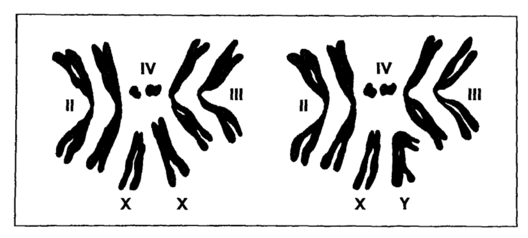
المخصبـة خلال عمرها القصير والعشائر الكبيرة الناتجة تجعل التحليلات الأحصائية سهلة ويعتمد عليها. وهناك سبب رابع تم إكتشافه وهو وجود كروموسومات عملاقة في غدد اللعاب عند اليرقات. هذه الكروموسومات (الشكل ١١-٣) تبين فيها تفاصيل تركيبية أكثر بكثير مما تبـديه الكروموسومات العادية في خلايا الجسم. كما أن هذه الكـرومـوسومات تكـون مرئية خلال مرحلة ما بين الأنقسامات interphase حيث تكـون الكـرومـوسـومـات عادة غير واضحة المعالم. أصل الكروموسومات العملاقة وفوائدها الخاصة في البحوث سوف نتعرض لها بالشرح في الباب ١٥ والباب ١٨.

على الرغم من أن أنثى ذبابة الفاكهة بها أربعة أزواج متماثلة من الكروموسومات (الشكل ١١-٤) إلا أن الذكر به ثلاثة أزواج متماثلة فقط. الكروموسومان الباقيان غير

متماثليـن. أحـد فـردى هـذا الـزوج الرابـع مـن الكروموسومـات يطابـق في مظهره الزوج الرابع في الأناث هو يسمى الكروموسـوم X. أما الفرد الآخر فهو مختلف تماماً في مظهره ويسمى كروموسوم Y (الشكل ١١-٤). ويسمى الكروموسوم X والكروموسوم Y معـا بالكروموسومات الجنسية sex chromosomes لأن وجودهما مرتبط دائما بالجنس في الـذبـابـة. أمـا بقية الكروموسومات فتسمى بالكروموسومات الذاتيـة autosomes. كنتيجة لفصل أزواج الكروموسومات المتماثلة أثناء الانقسام الاختزالي فان بيضات ذبابة الفـاكهـة تحتـوي على واحد مـن كل مـن الكروموسومات الذاتية زائد كروموسوم X واحد. أما الخلايا المنوية التي تنتجها الذبابة الذكر فتحتوي على ثلاثة كروموسومات ذاتيـة وكروموسوم X أو كروموسـوم Y. ويمكننا توضيح نتائج الاندماج العشوائي بين هذه البيضات والحيوانات المنوية بمربع بونيت (الشكل ١١-٥).

(لاحظ أن الرموز تعني الآن الكروموسومات كاملة ولا تعني جينات). وبسرعة يمكن للمرء أن يستنتج أن النسل سوف يتكون بالتساوي من ذكور وأناث وهذا ما يحدث بالفعل.

الأختلافات بين الذكور والأناث ترتبط ببعض الصفات المتوارثة المحددة. فتوزيع الأصباغ في منطقة البطن في الذكور (الشكل ١١-٢) وعضو التذكير والأشواك الموجودة على القـطعة الرسغية الأولى من الرجل الأمامية ليست إلا بعض الصفات التي تميز



الشكل ١١-٤. الكروموسومات في ذبابة الفاكهة. كل جنس به ثلاثة أزواج من الكروموسومات المتماثلة الذاتية. بالاضافة الى ذلك يوجد بالاناث زوج من كروموسومات X (الـى اليسـار) وفـي الـذكور كروموسوم X وكروموسوم Y (الى اليمين). هذه هي كروموسومات الجنس.

الشكـل ١١-٥. تحديـد الجنس. يوجـد في كل مشيـج كروموسوم جنس واحد. في الثدييات الزيجوت الذي يتلقى ٢ كروموسوم X يكون أنثى والزيجوت الذي يتلقى كـروموسـوم X و كروموسـوم Y يكون ذكر. على ذلك تكون كروموسومات الحيوان المنوى هي المحددة للجنس في النسل.

الذكور في ذبابة الفاكهة عن الأناث. ومجرد الأرتباط بين وجود أو غياب هذه الصفات وكروموسومات الجنس لهو دليل على صحة النظرية الكروموسومية في الوراثة.

ومـن الواضـح أنه يمكن إعتبار الكروموسوم Y كحامل للجينات المحددة للذكورة وهذه هي الحالة فعلا في الثدييات بما في ذلك الأنسان. أما في الكثير من الحشرات (بما في ذلـك ذبابـة الفاكهـة) فان الكروموسـوم Y يبدو خاملا وراثيا فقد أمكن إكتشاف عدد قليل من الجينـات عليه وهـذه ليس لها علاقـة مبـاشرة بالجنس. وربـما كانت الكروموسومات الذاتية تحمل الجينات المحددة للذكورة وأنه يلزم جينان من النوع X لألغـاء تأثـيرهمـا وظهـور الأنـوثة. والحقيقة أن ذكر النطاط grasshopper ليس فيه كروموسـوم Y بالمرة وإنمـا كروموسـوم X واحد بينما يوجد في الأناث إثنان لهي دليل يـؤيد هذه الفكـرة. في الطيور يوجد الكروموسومان Y X في الأناث بينما يوجد XX في الذكور. وفي الزواحف والبرمائيات والأسماك ذات الكروموسومات الجنسية فان بعض الأنواع تكون فيهـا الأناث متماثلة المشيج homogametic (XX) وفي البعض الأخر تكون الذكور متماثلة المشيج.

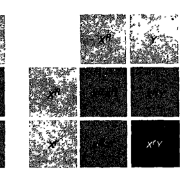
وأيا كانت الآليات المعنية فان الجنس في المملكة الحيوانية يبدو مرتبطا مباشرة بترتيب كرومـوسومات معينة وبذلك يؤيد النظرية العامة أن الكروموسومات تحمل محددات الصفات في الكائن.

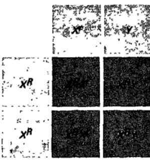
١١-٣. إرتبـاط على X   X-LINKAGE

إكتشاف آلية تحديد الجنس في ذبابة الفاكهة مهد السبيل بسرعة لأختبار آخر للنظرية

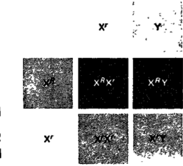
الكروموسومية وهو الخاص بتوارث صفة واحدة. في إحدى مزارع مورجان من ذبابة الفاكهة ظهرت ذبابة مذكرة عيونها بيضاء بدلا من اللون الأحمر اللامع المميز للنوع. وعند تزاوج هذه الذبابة مع أنثى حمراء العيون عادية كان لكل النسل عيون حمراء. وقد أوحى ذلـك بأنـه إذا كان جين معين يتحكم في صفة بياض العين فلابد أنه يكون متنحيا. وحسب قانون الأنعزال لمندل فأن كل أفراد الجيل الأول حمر العيون لابد أن يكونوا هجن بالنسبة لهذه الصفة (لماذا؟). وحينئذ يمكننا أن نتنبأ بأنه إذا تزاوج فردان حمر العيون من الجيل الأول فأن ربـع ذبـابات الجيل الثاني ستكون بيضاء العيون. وعندما قام مورجان بهذا التهجين وجد أن ذلك قد حدث بالفعل ومع ذلك كانت كل الذبابات بيضاء العيون مذكرة ولم تظهر أنثى واحدة بيضاء العيون. وقد فكر مورجان أن هذا النوع الفريد من التوارث المرتبط بالجنس يمكن تفسيره إذا أفترض أن الجينات المعنية بهذه الصفة كانـت على الكروموسوم X. الذبابات المؤنثة وبها كروموسومين X لابد أن تكون متشابهة اللاقحة لبياض العيون حتى تظهر عليها هذه الصفة أما الذكور وبها كروموسوم X واحد فتبدو عليها الصفة أيا كان نوع الجين الموجود على هذا الكروموسوم. حتى إذا كان الجين المتنحى (r) فإن الكروموسوم Y لن يحتوي على الجين الذي يمكن أن يكون سائداً عليه.

الشكل ١١-٦ يبيـن تخطيطيـا فكـرة مورجـان عمـا حـدث فـي أول تهجينيـن أجـراهمـا. مرة أخرى الرمزان X و Y يرمـزان الـى الكـرومـوسـومـات المرئيـة بينمـا





الشكـل ١١-٦. آليـة الارتباط على الكروموسـوم X. الجـين المتنحى المـرتبط بالكـروموسوم X يظهر تأثيره في الذكور لأن الموقع المقابل على الكـرومـوسـوم Y غيـر موجـود. R = جين سائـد مرتبط بالكروموسوم X وينتج عيـون حمـراء فـي ذبـابـة الفاكهـة - r = الجين المتنحى المـرتبط بالكـروموسـوم X وينتج عيون بيضاء.

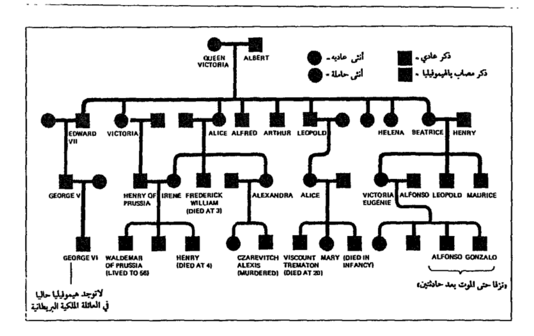


الشكل ١١-٧. التلقيح الاختباري الذي أجراه مورجان بتهجين ذكور بيض العيون مع اناث حاملة تمكن مورجان من انتاج اناث بيض العيون.

الحرفان العلويان R و r فيرمزان الى الجين السائد والجين المتنحى على الترتيب. إذا صح هذا الأفتراض فانه يكون من الممكن إنتاج إناث بيض العيون بالتزاوج بين ذكور بيض العيون مع إناث من الجيل الأول. وقد أجرى مورجان هذا التهجين وأنتج كل الأنواع الأربعة من الذباب وبأعداد متساوية تقريبا (الشكل ١١-٧). ويمكننا اليوم أن نسمى هذا النوع من التوارث بالمرتبط مع X لأن الجينات موجودة على الكروموسوم X.

في البشر يكون عمى الألوان والنزيف المعروف باسـم هيموفيليا hemophilia وأكثر من مائة صفة أخرى تنتجها جينات موجودة على الكروموسوم X. وهذه الصفات تكون نادرة في الأناث لأنه عليهم أن يرثوا العاملين المنتجين من الأب ومن الأم حتى تظهر عليهم هذه الصفات. وهذا إحتمال بعيد خاصة في حالة الهيموفيليا إذ أن المريض بهذا الداء نادرا ما يصير أبا. الشكل ١١-٨ يبين شجرة العائلة لأحفاد الملكة فيكتوريا. لاحظ أن جين الهيموفيليا الذي أبتليت به البيوت الملكية في أوروبا منذ عهدها كان دائما تقريبا ينتقل من خلال الأمهات اللائي كن متباينات اللاحقة في هذه الصفة وبالتالي لم تبد عليهن أي أعراض للمرض ونحن نسميهن حاملات carriers لأنه على الرغم من خلوهن من الأعراض إلا أنهن قد نقلن الجين المتنحى لحوالي نصف أبنائهن الذين أصيبوا بالنزيف.

يمكن تجنب الكثير من العجز والحزن إذا تمكنا من التوصل الى طريقة للكشف عن حوامل العيوب الوراثية. فمعرفة حالتهم الوراثية تشكل أساس لتقييم خطورة إنتقال هذه العيوب الى الأبناء. بالنسبة للكثير من العيوب الوراثية (بما في ذلك الهيموفيليا) فأن وجود جين واحد يسمح بأداء وظيفي عادي أي أن الجين الجيد يبدو سائداً. ومع ذلك فقد ظهرت إختبارات كيميائية حساسة بحيث أصبح الآن ممكنا في أغلب الأحوال

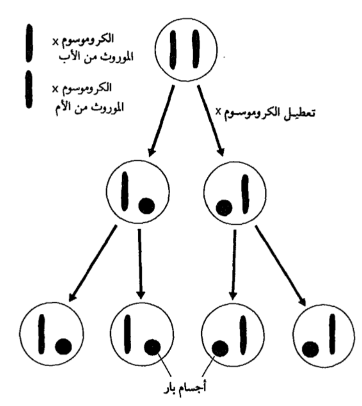


الشكـل ١١-٨. شجرة العائلة وهي توضح توارث نزف الدم (هيموفيليا) - صفة مرتبطة بالكروموسوم X - في ذرية الملكة فيكتوريا. كثيرون من هذه الذرية من الجيل الثالث و الجيل الرابع (الصف الثالث والصف الرابع) قد أغفلوا هنا لأن الجين المتطفر لم ينتقل اليهم. علامة الاستفهام عند بعض الأفراد تعنى أن حالتهم غير مؤكدة.

الكشف عن المستويات المنخفضة من نشاط الجينات في «الحوامل» ربما كان سبب ذلك في بعض الحالات أن جين واحد لا يستطيع أن يؤدي العمل مثلما يؤدية جينان. وفي حالـة الجينـات المـرتبـطة مع X هنـاك آلية أخـرى لها دور وهي توقف نشـاط أحـد الكروموسومين X في كل خلية من خلايا الأنثى.

أثنـاء الـطور البيني تكـون الكـرومـوسـومـات صغيرة للغاية بحيث لايمكن صبغها ومشاهدتها بالمجهر. ومع ذلك يوجد في إناث الثدييات تركيب كثيف يمكن صبغه في كل أنوية الطور البيني وهو لا يوجد في الذكور العاديين. هذا التركيب (الذي يسمى جسم بار Barr body نسبة الى مكتشفه) هو أحد الكروموسومين X. ومظهره الكثيف هو إنعكاس لتوقف نشاطه.

ويبدو أنه في المراحل الأولى من نشأة الجنين فأن واحدا أو الآخر من الكروموسومين X في الأناث يصبح عديم النشاط ويتحول الى جسم بار (الشكل ١١-٩). وربما يكون فقـد نشـاط أحـد الكروموسومين أو الآخر مسألة صدفة (ماعدا في حالة الحيوانات



الشكل ١١-٩. فقدان الكروموسوم X لنشاطه مع تكوين أجسام بار. أي واحد من كروموسوم X هو الذي يفقد نشاطه مسألة صدفة ومع ذلك فان كل الخلايا المنحدرة عن تلك الخلية سيكون بها نفس الكروموسوم X فاقدا لنشاطة.

الكيسية marsupials مثل الكانجارو حيث يكون الكروموسوم X الموروث من الأب هو الذي يفقد نشاطه). وبعد أن يتوقف نشاط الكروموسوم فإن كل النسل المنحدر عن هذه الخلية سيكون فيه الكروموسوم في الحالة غير الفعالة. ولنا مرة أخرى أن نستعمل اللفظ جماعة clone لوصف نسل هذه الخلية. وعلى الرغم من أن جميع الخلايا في فرد ماقد يكون لها نفس المحتوي الجيني المطلق فأن فقد نشاط الكروموسوم X ينجم عنه تكوين تحت عشائر subpopulations (أو جماعات) متباينة في محتواها الجيني الفعال.

يشتمل العديد من العيوب الوراثية المرتبطة بالكروموسوم X على نقص في تخليق الأنزيمات. عندما تؤخذ خلايا من نساء يحملن مثل تلك الصفات وتربي في مزرعة نسيجية tissue culture فأننا نتوقع أن نجد بعض الخلايا التي يظهر فيها هذا العيب والبعض الأخر الذي لا يظهر فيه العيب. وفي أربع من هذه الحالات على الأقل أمكن التعرف على وجود مثل هذه العشائر. الجماعات التي تفشل في التعبير عن النشاط الأنزيمي ربما كانت منحدرة عن خلية توقف الكروموسوم X فيها وعليه الجين العادي عن النشاط. الكائن الذي تختلف خلاياه في محتواها الجيني الفعال

وبالتالي في التعبير عن صفة ما يسمى مبرقش وراثي genetic mosaic.

إكتشاف وتحليل الصفات المرتبطة بالكروموسوم X وتعبيرهم المبرقش الفريد أدى الى المزيد من التدعيم للنظرية الكروموسومية في الوراثة. وكل واحد من الأمثلة التي سبق وصفها يمكن تفسيره على أحسن وجه بأفتراض أن الجينات المعنية توجد على كروموسوم معين.

١١-٤ . الشواذ الكروموسومية CHROMOSOME ABNORMALITIES

أوضح تحليل النواة karyotype analysis (الشكل ١١-١٠) أنه في حوالي ٣٪ من حالات الحمل في الأنسان تحتوي خلايا الطفل على كروموسومات شاذة وغالبا ما تكون هذه الشواذ مرتبطة بتشوهات شديدة ولكن ليس دائما. وتقع الشواذ الكروموسومية في مجموعتين رئيسيتين هما: (١) تغيرات في عدد الكروموسومات و (٢) تغيرات في تركيب واحد أو أكثر من الكروموسومات. ينشأ معظم الخلل في أعداد الكروموسومات في البشر بسبب عدم نجاح الأنفصال nondisjunction. لعلك تذكر أنه في الأنقسام الأختزالي تنفصل الكروموسومات المتماثلة ويذهب كل واحد منهما إلى أحد قطبي الخلية. في حالات نادرة يفشل زوج من الكروموسومات المتماثلة في الأنفصال (و هذا هو عدم نجاح الأنفصال) وكنتيجة لذلك فأن إحدى الخليتين البنويتين تحصل على الكروموسومين المتماثلين معاً ولا تحصل الأخرى على أي منهما.

إذا إستخدم الحيوان المنوي أو البويضة الناتجة من مثل تلك الخلايا المعنية في الأخصاب فسوف تنتقل الزيادة أوالنقص الكروموسومي الموجود بها الى الزيجوت. ويعاني حوالي ٠,٢٪ من المواليد من مرض داون Down's syndrome الذي يتميز بعدد من العيوب تشمل التخلف العقلي الشديد والقابلية الشديدة للأصابة بسرطان الدم leukemia. وتحليل النواة لهؤلاء الأطفال التعساء يكشف عن وجود ٤٧ كروموسوم بدلا من ٤٦ والكروموسوم الزائد هو رقم ٢١ (الشكل ١١-١). وإحدى الطرق التي يتلقى بها الزيجوت ثلاثة كروموسومات رقم ٢١ هي عدم نجاح الأنفصال أثناء تكون البويضات وهو ما يؤدي الى حصول بويضة على كروموسومين رقم ٢١ من الأم. وتزداد فرصة حدوث ذلك بأزدياد العمر فالنساء المتقدمات في السن يكن عرضة أكثر من غيرهن الصغيرات نسبياً لأنجاب أطفال بهم هذا العيب. وقد تم الكشف كذلك عن وجود



(أ)

الشكل ١١-١٠ . (أ) ٤٦ كروموسوم من امرأة . كروموسومي X مميزان بعلامة (بتصريح من الدكتورين ت. ت. بك و ج. هـ. تجيو). التركيب الكروموسومي يمكن تحليله بسهولة عند قطع الصورة الى أجزاء يحتوي كل منها على كروموسوم واحد ، ترتيبهم في أزواج متماثلة.

(ب)

(ب) التركيب الكروموسومي لرجل عادي. الكروموسوم X والكروموسوم Y مميزان بحرفي X و Y.

(ج)

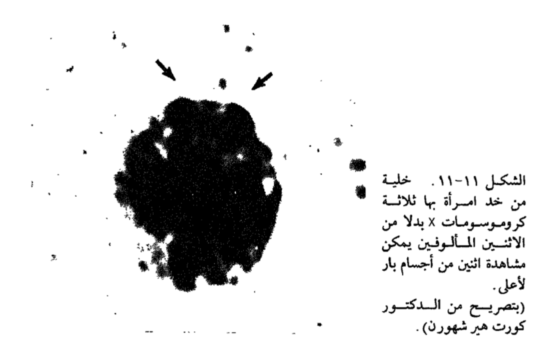
(ج) التركيب الكروموسومي لضحية من ضحايا مرض داون. بسبب وجود الكروموسوم الثالث رقم ٢١ فان المرض يعرف أيضا بالجسم الثلاثي ٢١ (trisomy 21) ماذا كان جنس هذا الفرد ؟ (الشكلان ب و ج). (بتصريح من الدكتور جيمس ل. جرمان الثالث).

أطفال بهم ثلاثة كروموسومات رقم ١٣ أو ثلاثة كروموسومات رقم ١٨ ويكون كل من هذين العيبين مصحوباً بتشوهات تركيبية شديدة.

توجد أيضا أعداد شاذة من كروموسومات الجنس ولكن بدرجة أقل. هذه الشواذ الكروموسومية لاتؤدي الى مثل تلك التشوهات الشديدة التي تنجم عن الكروموسومات الذاتية. الأشخاص الذين لديهم XXY أو XXXY ينشأون كذكور (بسبب وجود الكروموسوم Y) ولكنهم يكونوا عقيمين (تسمى هذه الحالة بمرض كلاينفلتر Klinefelter's syndrome) الذكور اللذين لديهم XYY معروفون أيضا وقد أوضحت الدراسات في كل من إنجلترا والولايات المتحدة أن هذا التركيب الكروموسومي مرتبط بالزيادة في الطول (٦ أقدام أو أكثر) كما أنه أكثر إنتشارا بين نزلاء السجون والمصحات العقلية عنه في عامة الناس.

هناك إناث بهن كروموسوم X مفرد وعلى الرغم من أن هذه حالة غير عادية فان مجرد أنهن أحياء أصلا يدعم الفكرة التي ناقشناها سابقا في هذا الباب أن كروموسوم X واحد يقوم بالمهمة في خلايا الاناث وهذا يفسر أيضا الرأفة النسبية للتراكيب الكروموسومية XXX و XXXX وحتى XXXXX التي وجدت جميعا في الاناث. وبينما يكون بالاناث العاديين كروموسوم X فاقد النشاط وبالتالي جسم بار واحد فان جميع كروموسومات X في هؤلاء الاناث تفقد نشاطها ويكون عدد أجسام بار في خلاياهن مساويا لعدد كروموسومات X ناقص واحد (الشكل ١١-١١).

في النباتات ونادراً في الحيوانات نجد أحيانا صورة أخرى من صور الشذوذ في عدد الكروموسومات تسمى التضاعف الكروموسومي polyploidy. أكثر أسباب حدوث التضاعف الكروموسومي شيوعا هو فشل الأجزاء المؤنثة في الأزهار في إختزال المحتوي الكروموسومي للبويضات أثناء الأنقسام الأختزالي. وحينا يتم إخصاب هذه البويضات ثنائية العدد الكروموسومي بواسطة أمشاج مذكرة عادية (ن) فان النسل يكون ثلاثي العدد الكروموسومي triploid (٣ن). وحينما يتم إخصاب أمشاج الأناث ثلاثية العدد الصبغي بواسطة أمشاج مذكرة عادية ينتج نسل رباعي العدد الصبغي (٤ن). الخلية التي تحتوي على أي مضاعفات للعدد الأحادي من الكروموسومات أكبر من ٢ تسمى متضاعفة العدد الكروموسومي. والتضاعف الكروموسومي غالبا يوجد في العشائر النباتية الطبيعية. يوجد نوع من النجيليات في نيوزيلندة به ٣٨ ضعف العدد الأحادي



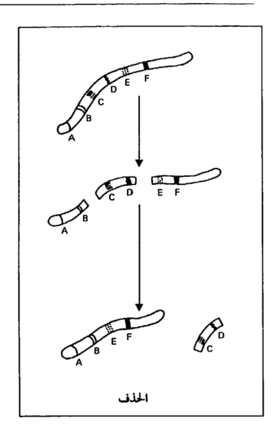
الشكـل ١١-١١. خليـة من خد امـرأة بها ثلاثـة كرومـوسـومـات X بدلا من الاثنـين المـألـوفـين يمكن مشاهدة اثنين من أجسام بار لأعلى.
(بتصريـح من الـدكتـور كورت هير شهورن).

من الكروموسومات (٣٨ن حيث ن = ٧).

يمكن إحـداث التضـاعف الكـرومـوسومي أيضا بمعالجة الخلايا المنقسمة بمادة الكولشيسين colchicine. تعمل هذه المادة على تحطيم الأنابيب الدقيقة وبذلك تمنع تكـوين المغـزل. وينتج عن ذلك أن الكروموسومات المتضاعفة تفشل في الأنفصال والتحرك نحو قطبي الخلية وقد وجد أن خلايا البصل التي تتعرض لتأثير الكولشيسين لعدة أيام تحتوي على أكثر من ألف كروموسوم بداخلها.

غالبا مايصاحب التضاعف الكروموسومي في النباتات زيادة في الحجم والقوة. ولهذا السبب تمكن مربـوا النبـاتات من إنتاج عددٍ من أصناف الأنواع الهامة إقتصادياً بها تضاعف كروموسومي مثل الذرة والبطيخ وبعض نباتات الزينة.

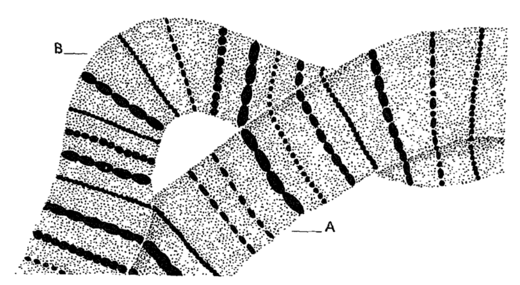
يبـدو أن التغيـرات التـركيبيـة structural alterations في الكروموسومات تحدث عندما يلي كسر الكروموسوم فشل في إعادة ترتيب الأجزاء المكسورة. مثال ذلك عندما تفقـد قطعـة من الكـروموسـوم ممـا يسفر عن حدوث مـا يسمى بالحذف deletion (الشكل ١١-١٢). عندما يبدأ كروموسوم فيه مثل هذا الحذف في الأزدواج مع مثيله فأن الأجزاء المتماثلة منها فقط تقترب من بعضها وتكون النتيجة هي ظهور إلتواء loop



الشكل ١١-١٢. آلية الحذف.

في الكروموسوم العادي (الشكل ١١-١٣). وقد يبدو هذا الحذف على الطراز المظهري للكائن. فمثلا يظهر تأثير جين متنحى موجود على الكروموسوم العادي إذا كان نظيره السائد يقع على القطعة المفقودة من الكروموسوم الذي حدث به الحذف. شكل من أشكال سرطان الدم في الأنسان يرتبط بوجود حذف في الكروموسوم رقم **٢٢** في خلايا الدم البيضاء. والقدرة على الربط بين صفة معينة وكروموسوم يمكن مشاهدته مجهرياً تقدم دليلا قوياً على صحة النظرية الكروموسومية.

حدوث كسر في الكروموسومات قد يؤدي أيضا الى حدوث إنقلابات inver-sions وإنتقالات translocations. في الأنقلاب تلف قطعة من الكروموسوم (ADCBE←ABCDE) و نادراً مايكون للانقلاب نتائج خطيرة على الطراز المظهري للكائن حيث أن كل الجينات مازالت موجودة. تنشأ الصعوبات عندما يبدأ كروموسوم فيه إنقلاب في الأزدواج والعبور مع مثيله العادي أثناء الأنقسام الأختزالي وبالتالي تنتج خلايا جنسية معيبة قد تؤدي الى العقم الجزئي أو الى عيوب خطيرة في النسل. يسهل الكشف عن الانقلابات في الكروموسومات العملاقة مثل تلك الموجودة في غدد اللعاب



الشكل ١١-١٣ . الازدواج بين كروموسوم فيه حذف (A) مع مثيلة العادي (B) الجزء المنحنى في (B) يقابل الجزء المحذوف من A

بذبابة الفاكهة حيث إكتشفت فيها لأول مرة. وقد أدى التقدم الحديث الى التعرف على إنقلابات في كروموسومات البشر كذلك.

أحيـانا تنفصـل قطعـة من أحـد الكروموسومـات ثـم تلتـصـق مـع كروموســوم أخـر ليـس مماثـلا له ويسمى ذلــك بالأنتقــال translocation (الشكــل ١١-٤) والكائنات التي يحدث بها الأنتقال تكون لديها مشاكل خصوبة لأن نصف الأمشاج الناتجة من الأنقسام الأختزالي أو أكثر سيكون بها حذف وقد لا تكون قادرة على إنجاب نسل حي. وتوجد الأنتقالات الآن بصورة شائعة في كروموسومات الأنسان وخاصة من تكررت لديهم ولادة أطفال موتى أو بهم عيوب خلقية.

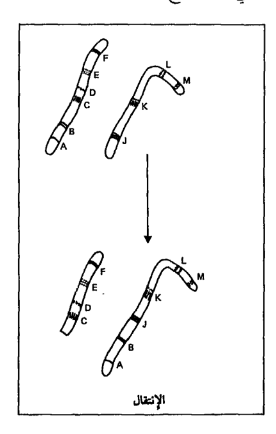
أمكن التعرف على عدد كبير من مسببات الكسر في الكروموسومات وهي تشمل أشعـة X و أنـواع أخـرى من الأشعاع المؤين. والكسور الناجمة عن الأشعاع تكون عشوائية بالكامل أي أنه يمكن أن تحدث في أي جزء من الكروموسوم.

هنـاك مواد كيميائية عديدة تسبب كسر الكروموسومات وهي تشمل المواد المثبطة لتخليق حامض DNA ومضـادات حيوية معينة. أغلب الكسور الناجمة عن مركبات كيميائية تحدث في أماكن محددة على الكروموسوم و غالبا عند القطعة المركزية أو الأجزاء

الضيقـة الأخرى في الكروموسوم. ترتبط الكسور في الكروموسومات أيضا بالأصابة بالفـيروسـات وقـد أشـار البعض في هذا الصـدد الى الحصبة والجديري والألتهاب السحائي الفيروسي viral meningitis.

١١-٥. الارتباط LINKAGE

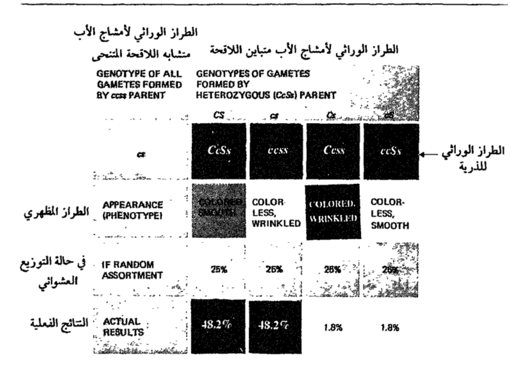
أشرنا في بداية هذا الباب الى أن العدد الكبير من الجينات والعدد القليل نسبيا من الكروموسومات في الكائن يتطلبان أن كل زوج من الكروموسومات يحمل مواقع عديدة للجينـات. وعنـدما تعرضنا لتوارث صفتين تتحكم فيهما جينات موجودة على نفس الكروموسوم تبين بوضوح أن قانون التوزيع المستقل لمندل لا يسري مفعوله. وقد تتذكر من الباب السابق أن مندل قد توصل الى سلالات عديدة من الهجن متباينة اللاقحة فـي صفتيـن مختلفتيـن مثـل شكل البـذرة ولـون الفلقـات . عنـدما يتزاوج هجين ثنائي (Rr Yy) مع أحد الآباء متشابهة اللاحقة متنحى (تلقيح إختباري) لم يحتوي الجيل



الشكل ١١-١٤. آلية الإنتقال.

الناتج على أفراد من شاكلة الآباء فقط (مستديرة - صفراء، مجعدة - خضراء) وإنما أيضا على أفراد بها تجمعات جديدة من الصفات هي مستديرة - خضراء و مجعدة - صفـراء. هـؤلاء الأفراد يسمـون المستحدثـة recombinants و كانت أعداد الأفراد من كل نوع من الأنواع الأربعة متساوية تقريبا. والآن نعرف أن هذا التوزيع المستقل للجينـات حدث لأن مواقع الجينات المتحكمة في هاتين الصفتين كانت على زوجين مختلفين من الكروموسومات. بسبب الترتيب العشوائي للكروموسومات الأبوية والأمية على جانبي خط الأستواء في الأنقسام الأختزالي الأول نتج التوزيع العشوائي للجينات وترتب على ذلك أن صاغ مندل قانونه الثاني أوقانون التوزيع المستقل: توزيع زوج واحد من العوامل الوراثية يكون مستقلا عن توزيع الزوج الآخر.

وبعد إعادة إكتشاف دراسات مندل بوقت قصير إتضح أن قانونه الثاني لايستطيع أن يفسر توارث العديد من الهجن الثنائية. ففي كثير من الحالات كان زوج الجينات المتضاد alleles الموروث من أحد الآباء يبدي ميلا قويا نحو الانعزال مع بعضهما عند تكـوين الأمشاج بينما يفعل زوج الجينات المتضادة الموروث من الأب الأخر بالمثل. تسمى هذه الـظاهـرة الأرتباط linkage. دعنا نتعرض لأحد أمثلة الارتباط في الذرة. يمكن الحصـول على صنف تكون حبوبه صفراء وممتلئة بنسيج تخزين المواد الغذائية المسمى إندوسبرم endosperm وهي سلالة نقية مما يعني أنها متشابهة اللاحقة في هاتين الصفتين. ويمكن الحصول كذلك على صنف نقي بالنسبة لبياض الحبوب وتجعدها لأن بها إندوسبرم منكمش. عند تعفير المياسم الحريرية للصنف الثاني (P) بحبوب لقاح من الصنف الأول (P) أو العكس تكون الحبوب الناتجة (الجيل الأول) جميعا صفراء وملساء وذلـك يدل على أن الجينـات الخاصـة باللـون (C) والنعومة (S) سائدة على تلك الخاصة بانعدام اللون (c) والاندوسبرم المجعد (s) (الشكل ١١-١٥). ثم يتم تهجين نباتات الجيل الأول مع الصنف متشابه الـلاحـقـة المتنحـى (cc ss) لكى نتوصل إلى نوع الأمشاج التي تنتجها نباتات الجيل الأول. طبقا للقانون الثاني لمندل ينبغي أن يكون توارث الجينات الخاصة باللون مستقلا تماما عن توارث الجينات المحددة لمظهر الأنـدوسـبرم وعلى ذلك ينبغي للجيل الأول متباين اللاحقة أن ينتج الأمشاج الأتية

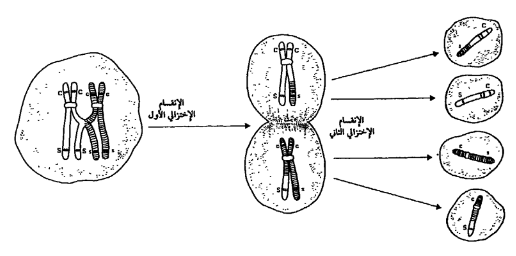


الشكل ١١-١٥ . بيان الارتباط في الذرة. لأن موقع الجين الخاص بلون الحبوب يوجد على نفس الكروموسوم الذي يوجد عليه موقع الجين الخاص بملمس الحبوب فانه يتم توارث هذه الجينات معا. لا تتكون المستحدثات الا عندما يحدث العبور الذي يفصل مواقع الجينات عن بعضها (أنظر الشكل ١١-١٦).

بأعداد متساوية تقريبا: (١) CS كما ورثها من أحد الأباء. (٢) cs كما ورثها عن الأب الأخر. (٣) Cs وهو مستحدث. (٤) cS وهو أيضا مستحدث. أما جميع الأمشاج التي ينتجها متشابه اللاحقة المتنحي فتكون cs.

الأندماج العشوائي بين هذه الأمشاج ينبغي أن يسفر عن تكوين أربعة أنواع من الأفراد:

(١) ملونة ملساء كما في الصنف الأصلي (٢) عديمة اللون مجعدة كما في الصنف الأصلي الآخر (٣) ملونة مجعدة وهو صنف مستحدث و (٤) عديمة اللون ملساء وهو صنف مستحدث آخر. النتائج الفعلية التي توصل اليها هذا التهجين مبينة في الشكل ١١-١٥ . يتضح بجلاء أن قانون التوزيع المستقل لمندل لا يتحقق فهناك ميل قوي عند الجين الخاص باللون (C) أن يظل مصاحبا للجين الخاص بنعومة الملمس (S) وبالمثل بالنسبة للجين c الذي يبقى مصاحبا للجين s. وكما رأينا فأنه يمكن تفسير ذلك



الشكـل ١١-١٦ . رسم تخطيطي لاعـادة تجميع الجينات المترابطة . كلما تقاربت المواقع على الكروموسوم كلما تضاءلت نسبة تكوين الأمشاج المستحدثة .

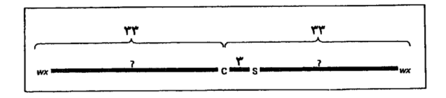
على أسـاس إفـتراض أن مواقع الجينات المتحكمة في لون الحبوب تكون على نفس الكروموسومات التي توجد بها مواقع الجينات المتحكمة في ملمس الحبوب . في الجيل الأول وعندما تنفصل الكروموسومات في الأنقسام الأختزالي الأول يذهب الكروموسوم الأبـوى (CS) إلى أحـد القطبين ويذهب الكروموسوم الأمي (cs) الى القطب الاخر (الشكل ١١-١٦) .

يبقي سؤال . إذا كانت مواقــع الجينـــات الخـــاصـة باللون والملمس على نفس الكـرومـوسـوم فكيـف نفسـر الأنـواع المستحـدثـة من الأفراد (ونسبتهم ٦ , ٣٪) والناتجة من التلقيح الأختباري؟ تبدو الأجابة واضحة عندما نتذكر ما يحدث بدقة في الـطور التمهيدي للأنقسام الأختزالي الأول . تتحد الكروموسومات المتماثلة المزدوجة أثناء الأزدواج synapsis ويتبادل كروماتيد من كل زوج متماثل قطعة واحدة أو أكثر مع الكروماتيد الأخر أثناء عملية العبور . عملية العبور هذه هي التي تؤدي الى تكوين هذه الأمشاج المستحدثة . في هذه الحالة كلما حدثت عملية عبور بين موقع الجين الخاص بلون الحبوب وموقع الجين الخاص بملمس الحبوب تنكسر التجمعات الجينية الأصلية (cs و CS) و ينتج كروموسوم يحتوي على Cs وكروموسوم يحتوي على cS . لاحظ أيضا أن الكروماتيدين الآخرين لايشتركان في عملية العبور . وبذلك يحتوي نصف الأمشاج النـاتجـة من الأنقسـام الأختـزالي الثاني فقط على الطراز الجيني المستحدث (الشكل

١١-١٦). لذلك فأنه من أجل أن ينتج ٦,٣٪ من الأمشاج المستحدثة لابد أن يحدث عبور بين مواقع الجينات بنسبة ٧,٢٪ أثناء الأنقسامات الأختزالية.

١١-٦. الخرائط الكروموسومية CHROMOSOME MAPS

تمت دراسة صفات مرتبطة أخرى في نباتات الذرة. في بعضها كانت نسبة الأمشاج المستحدثة والتي ينتجها الجيل الأول أقل من ٦,٣٪ وفي البعض الاخر كانت النسبة أعلى من ذلك. ولو إفترضنا للحظة أن مواقع الجينات كانت في ترتيب خطى من احدى نهايتي الكروموسوم الى النهاية الأخرى فيمكننا أن نستنتج أنه كلما زادت نسبة الأمشاج المستحدثة بالنسبة لأي زوج من الصفات كلما زادت المسافة الفاصلة بين موقعيهما. والعكس صحيح كذلك. وعلى أساس هذه المعلومات يمكن للمرء أن يرسم خريطة تبين مواقع كل ما يمكن إكتشافه من الجينات على أي كروموسوم. فمثلا رأينا أن حوالي ٣٪ من الأمشـاج المستحـدثـة تنتج من العبور بيـن موقعـي الجينيـن S و C. يمكن الحصـول علـى هجيـن ثنـائي لـزوج آخـر من الصفات المرتبطة ولتكن لـون الحبـوب (C) والأنـدوسبـرم الشمعـي (wx). هذا الهجين الثنائي يعطي ٣٣٪ أمشاج مستحدثة ممـا يوحـي بـأن الموقعين C و wx أكثر تباعدا من الموقعين C و S. وما زلنا لانعلم إن كان الموقع wx علـى نفـس الجانب من C مع S أو على الجانب الأخر (الشكل ١١-١٧). ويمكن التوصل إلى إجابة على ذلك بالحصول على هجين ثنائي للصفتين S و wx فاذا كانت نسبة الأمشاج المستحدثة الناتجة من هذا الفرد أقل من ٣٣ فأن الموقع wx لابد أن يكون على نفس الجانب من الموقع C الذي يوجد فيه الموقع S. والعكس صحيح إذا تبين أن نسبة الأمشاج المستحدثة كانت أكبر من ٣٣٪. في الواقع كان عدد الأمشاج المستحدثة ٣٠٪ وعلى ذلك يكون تتابع مواقع الجينات على هذا الكروموسوم هو



الشكـل ١١-١٧. رسم خريطة ارتباط. انتاج ٣٠٪ من الأمشاج المستحدثة كنتيجة للتهجين بين S و wx يوحي بأن الموقع wx يوجد على نفس الجانب من الموقع C الذي يوجد به الموقع S.

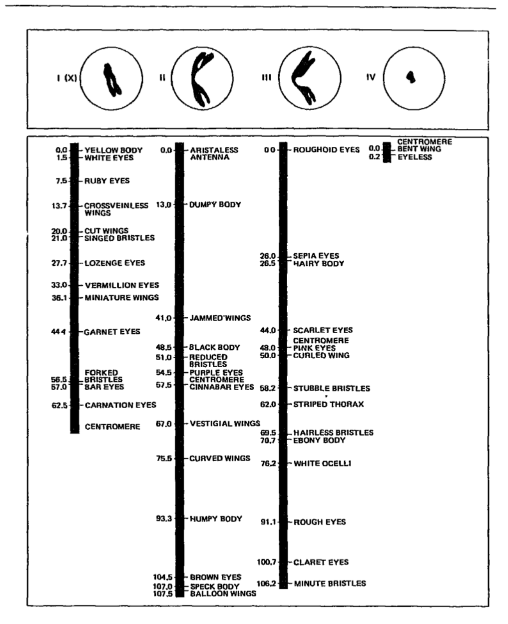
C-S-wx. أضف الى ذلك أن مجموع النسب المئوية للأمشاج المستحدثة بين C و S و بين S و wx يكاد يكون مســاويا للنسبــة المئوية بين C و wx وهذا يعطي تدعيم كبير لفكرة وجود مواقع الجينات في ترتيب خطى على طول الكروموسوم (الشكل ١١-١٧). الخط المستقيم هو الترتيب الهندسي الوحيد الذي يمكن أن توجد عليه هذه العلاقة العددية البسيطة.

مع مواصلة السعي بهذه الطريقة مع أكبر عدد ممكن من الجينات المرتبطة على نفس الكروموسوم يمكن رسم خرائط كروموسومية. هذه الخرائط تبين تتابع مواقع الجينات كما تبـين التبـاعـد النسبي بينهم وقد أنتجت مثل تلك الخرائط لكروموسومات ذبابة الفـاكهة (الشكل ١١-١٨) والذرة (الشكل ١١-١٩) وبعض البكتريا والفأر ودودة الحريـر والطماطم والكلاميدومونـاس والكرومـوسـوم X في الأنسان.

وكما تمكن علماء الوراثة من إثبات وجود الأرتباط بين جينات معينة وعدم وجوده بين جينات أخـرى فقـد تمكنوا من نسبة كل جين الى مجموعة ارتبـاطية linkage group. كل الجينات في مجموعة ما يكون بينها إرتباط ولا يكون بينها وبين الجينات في المجموعات الأخرى أي إرتباط. الشىء المثير في هذا المجال هو أن عدد المجموعات الأرتباطية في الكائن يكون مساويا لعدد أزواج الكروموسومات في هذا الكائن. وعلى ذلك فأن ذبابة الفاكهة بما لها من ٤ أزواج من الكروموسومات يكون بها أربع مجموعات إرتباطية. وفي نبات الذرة يوجد عشرة أزواج من الكروموسومات وجميع الجينات فيه لابد أن تنتسب الى واحدة من عشر مجموعات إرتباطية. وبالمثل في فطر نيوروسبورا وفي نبات الطماطم (الذين درسهما علماء الوراثة باستفاضة) يكون عدد المجموعات الأرتباطية مساويا لعدد أزواج الكروموسومات وهو ٧ في نيوروسبورا و ١٢ في الطماطم. هذا إذن دليل إضافي على أن جينات الكائن تقع في أو على كروموسومات.

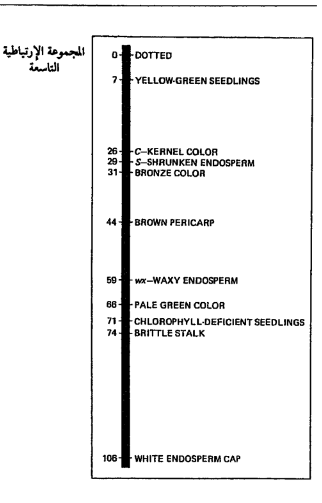
١١-٧. دليل كريتون ومكلنتوك
THE EVIDENCE OF CREIGHTON AND McCLINTOCK

واحد من أكثر الأدلة على صحة النظرية الكروموسومية رشاقة جاء في عام ١٩٣٢ من دراسات عالمتي الوراثة هاريت كريتون وباربرا مكلنتوك. ففي خلال دراستهما على الأرتباط في الذرة توصلتا الى سلالة بها كروموسوم واحد (من بين عشرة أزواج) فيه



الشكـل ١١-١٨ . خرائط لكـروموسومات ذبابة الفاكهة . عدد قليل فقط من مواقع الجينات المعروفة هو المبين .

خاصيتان غير مألوفتين : عقدة عند أحد طرفي الكروموسوم وقطعة زائدة عند الطرف الآخر . هذه القطعة الزائدة من الكروموسوم نتجت عن إنتقال حدث في جيل سابق . على الفور لاحظت الباحثتان أهمية وفائدة هذا الأكتشاف . فهنا يوجد كائن به زوج من الكـرومـوسـومات المتماثلة غير العادي يحمل الجين السائد للون الحبوب (S) والجيـن المتنحى للأندوسبرم الشمعي (wx) أما مثيله ذو المظهر العادي فيحمل الجين المتنحى

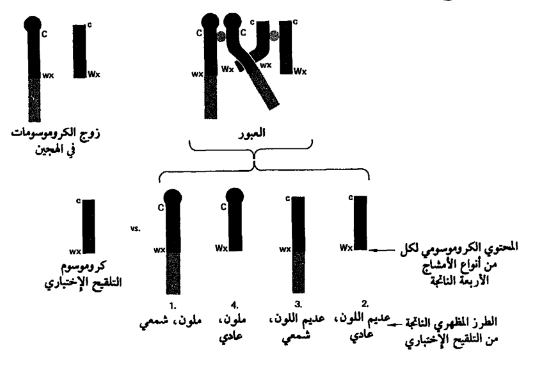


الشكـــل ١١-١٩. خريـطة الارتبـاط لأحد الكروموسومات الموجودة في نبات الذرة *Zea mays*.

لأنعدام اللون في الحبوب (s) والجين السائد للأندوسبرم العادي (النشوي) أي (Wx) وعلى ذلك يكـون النبـات هجـين ثنائي في هاتين الصفتين المرتبطتين كما أن أحد كروموسومات الزوج المتماثل يحمل علامة مميزة ومرئية عند طرف من طرفية. وقد فكرت كريتون ومكلنتوك في أن هذا النبات ينبغي أن ينتج أربعة أنواع من الأمشاج: النوعان الأبويان (cWx و Cwx) ونوعان مستحدثان (CWx و cwx) بواسطة العبور. تلقيح مثل هذه الأمشاج بواسطة أمشاج تحتوي على كروموسوم عادي المظهر وبه الجينان المتنحيان (تلقيح إختياري نموذجي) ينبغي أن ينتج أربعة أنواع من الحبوب: (١) ملونة شمعي (Cc Wx wx) و (٢) حبـوب عديمـة اللون وإندوسبرم عادي (cc Wx wx) و النوعين المستحدثين (٣) عديمة اللون شمعي (cc wx wx) و (٤) حبـوب ملونـة و إنـدوسبـرم عـادي (Cc Wx wx). أضف الى ذلك أن ذلك الفحص المجهري للنباتات الناتجة من هذه الأنواع الأربعة ينبغي أن يكشف عن وجود الأنواع الأتية من الكروموسومات. في

الحالة الأولى يجب أن يوجد الكروموسوم العادي والكروموسوم زائد الطول ويحمل عقدة عند أحد طرفيه. في الحالة الثانية يجب أن يكون لكلا الكروموسومين مظهر عادي أما في الحالة الثالثة حيث حدث العبور فأن المرء يأمل في الحصول على دليل يثبت حدوث تبادل فعلى للأجزاء بين الكروموسومات المتماثلة في الأب الهجين الثنائي فإما أن يوجد كروموسوم طوله عادي ولكن به عقدة عند أحد طرفيه أو يوجد كروموسوم زائد الطول وليس به عقدة. وقد وجدت كريتون ومكلنتوك بالفعل النوع الأخير مما يشير الى أن موقع الجين wx كان مصاحبا لنهاية الكروموسوم ذو القطعة الزائدة وبالتالي فهو قريب منها. أما موقع الجين الخاص بلون الحبوب فلابد أنه أقرب الى النهاية ذات العقدة. وقد كشف فحص النباتات من المجموعة الرابعة (حبوب ملونة وأندوسبرم عادي – Wx و C) عن وجود كروموسوم عادي الطول ولكن به عقدة عند إحدى نهايتية (الشكل ١١-٢٠).

وعلى ذلك يتضح أن سلوك الجينات كما تكشف عنه دراسة الطرز المظهرية مرتبط مباشرة بسلوك الكروموسومات كما يكشف عنه الفحص المجهري. والأن يتبين أن إعادة تجمع الجينات يحدث في نفس الوقت الذي تتبادل فيه الكروموسومات المتماثلة



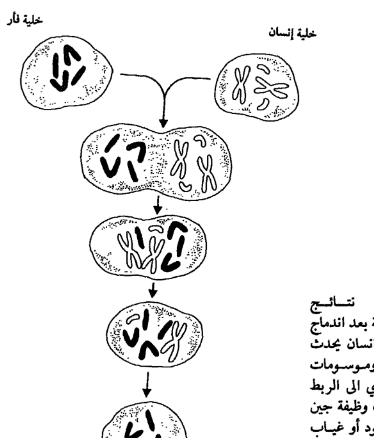
الشكل ١١-٢٠. العلاقة بين العبور الخلوي واعادة التجميع الوراثي في الذرة.

بعض أجزائها . وهذا توضيح مقنع للغاية بالنظرية الكروموسومية . فالوحدات المحددة لتوارث الصفات (الجينات) التي كان مندل أول من إفترض وجودها موجودة بالفعل على تلك الأجسام المرئية (الكروموسومات) .

١١-٨ . نسبة المجموعات الأرتباطية الى كروموسومات
ASSIGNING LINKAGE GROUPS TO CHROMOSOMES

إذا إستطاع باحث أن يتعرف على مجموعة إرتباطية ونسب أحد الجينات فيها الى زوج معين من الكروموسومات المتماثلة فانه يحصل فورا على قائمة بالصفات التي تتحكم فيها هذه الكروموسومات . المواد التي كانت تعمل بها كريتون ومكلنتوك مكنتهما من نسبة جميع الجينات المعروفة في المجموعة الأرتباطية التاسعة (linkage group IX) الى زوج واحد من الأزواج المتماثلة العشرة في نبات الذرة (الشكل ١١-١٩) . لقد تمكنتا من ذلك لأنهما استطاعتا نسبة جين معين الى كروموسوم معين يمكن تمييزه بالنظر عن بقية الكروموسومات (بما في ذلك مثيله) . وقد إعتمد نجاحهما على إكتشاف كروموسوم شاذ والقدرة على تهجين النبات الذي يحتوي عليه حسب رغبتهما . وقد تم حديثا إكتشاف إرتباطات قليلة بين توارث كروموسوم يمكن تمييزه بالنظر (وبالتالي يكون شاذا) وتوارث صفة معينة في الأنسان . وقد أثبتت طرق أخرى جدواها في نسبة جينات معروفة الى كروموسومات معينة . إحدى هذه الطرق بدأت في إعطاء معلومات مفيدة تعتمد على تهجين الخلايا الجسدية .

الخلايا البشرية النامية في مزارع أنسجة يمكن دفعها الى الأندماج مع خلايا حيوانات أخرى مثل الفأر . في البداية تحتوي هذه الخلايا الهجين على مجموعة كاملة من كروموسومات الإنسان وكروموسومات الفأر . ومع ذلك فعند إستمرار عملية الأنقسام غير المباشر يفقد العديد من الكروموسومات البشرية (الشكل ١١-٢١) . والآن فأن للخلايا البشرية عددا من الصفات الكيميائية (مثل وجود إنزيمات معينة) لاتشاركها فيهاخلايا الفأر . فإذا فقد إنزيم معين في جماعة من الخلايا الهجين كلما فقد كروموسوم بشري فأنه يمكننا أن نستنتج من ذلك أن الجين الذي يتحكم في تخليق هذا الأنزيم موجود على هذا الكروموسوم . فمثلا الخلايا الهجين من بشر وفأر والمنتجة لأنزيم بشرى



الشكـل ١١-٢١. نتـائـج تهجين خلايا جسدية بعد اندماج خلية فأر مع خلية انسان يحدث فقـد تدريجي للكـروموسـومات البشريـة وذلك يؤدي الى الربط بين وجـود أو غياب وظيفة جين بشرى معـين ووجـود أو غيـاب كروموسوم بشرى معين.

معين هو الببتيديز peptidase تحتفظ دائما بالكروموسوم البشري رقم ١ وبالعكس فأن الخلايا الهجين من بشر وفأر والتي ينقصها الكروموسوم البشري رقم ١ لا تنتج إنزيم الببتيديز. وقد أمكن إثبات أن حوالي تسعة جينات بشرية أخرى (بما فيها تلك التي تحدد عامل الدم Rh) تكون مترابطة مع جين الببتيديز وذلك من خلال دراسة بعض العائلات. وبالتالي نستنتج أن كل هذه الجينات موجودة على الكروموسوم رقم ١. وفي الشكل ١١—٢٢ توجد قائمة جزئية حديثة بتوزيع الجينات على الكروموسومات في البشر. وإلى أن تقرأ هذه القائمة ربما يكون طولها قد زاد كثيراً.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تترتب الجينـات في الكـائن في نظام خطى على كرومـوسـومـات. يحمـل زوج الكروموسومات المتماثلة نفس الجينات (أو النسخ المضادة لهذه الجينات) بنفس النظام.

الشكل ١١-٢٢. تحديد مواقع قلة من الجينات البشرية. في الواقع أمكن تحديد موقع جين واحد على الأقل على كل من الكروموسومات الذاتية الاثنين والعشرين في الانسان. بمجرد تحديد موقع أحد أفراد مجموعة ترابطية على أحد الكروموسومات فان كل أفراد نفس المجموعة الترابطية تقع على نفس الكروموسوم. باستثناء الجينات المترابطة مع الكروموسوم X فان أغلب الجينات في هذا الجدول قد أمكن نسبتها الى كروموسومات من خلال تحليل هجن الخلايا الجسدية.

الكروموسوم	الجينات
1	Rh factor, salivary and pancreatic amylase, 5S rRNA
6	Transplantation antigens (HLA), prolactin, pepsinogen
7	Histones
9	ABO blood groups, interferon
11	β chain of hemoglobin, insulin
12	3-phosphoglyceraldehyde dehydrogenase, peptidase B
14	Heavy chains of antibodies
15	Isocitrate dehydrogenase (mitochondrial)
16	α chain of hemoglobin
17	Collagen, growth hormone (GH)
18	Peptidase A
19	Glucose phosphate isomerase
22	Beta-galactosidase
X	Clotting factor VIII (absence produces hemophilia), over 100 others

المكان الذي يوجد فيه جين معين على الكروموسوم يسمى الموقع.

يتبع توارث الجينات التي توجد على الكروموسومات الجنسية قواعد خاصة. في أحد الأمثلة الشائعة والمسماة بالتوارث المرتبط مع X يتم التعبير عن الجينات المتنحية على الكروموسوم X في الطراز المظهري للذكور لأنه لا توجد المواقع المقابلة لها على الكروموسوم Y والتي يمكن أن تحمل الجينات السائدة عليها.

أثناء العبور في الأنقسام الأختزالي تتبادل الكروموسومات المتماثلة قطعا منها. هذا التبادل عادة ما يكون من الطرفين بحيث تظل الكروموسومات المستحدثة محتفظة بنفس الجينات وفي نفس الترتيب. ومع ذلك فأن الجينات الموجودة على هذه الكروموسومات المستحدثة تمثل تشكيلة من الجينات الأبوية والأمية.

كلما زاد قرب موقعين من بعضهما البعض كلما قلت فرصة أنفصالها عن بعضهما أثناء العبور. وعلى ذلك تميل الصفات التي يتحكمان فيها الى التوارث معا أي يكون بينهما

إرتباط وبتحديد معامل إعادة التجمع بين المواقع المنفصلة يمكن رسم خريطة توضح الترتيب والتباعد النسبي بينها .

أحيانا يكون سلوك الكروموسومات أثناء الأنقسام الأختزالي و / أو غير المباشر شاذاً بحيث تنشأ شواذ في تركيب أو أعـداد الكـروموسومات و غالبا ما تؤثر هذه الشواذ الكروموسومية على الطراز المظهري .

أدت طريقة تهجين الخلايا الجسدية الى إمكانية تحديد مكان وجود العديد من مواقع الجينات على كل من الكروموسومات الذاتية الأثنين والعشرين في الأنسان .

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ـ في الأنسان البصر السليم صفة مرتبطة بالكروموسوم X و الجين الخاص بها سائد على الجين الخاص بعمى اللونين الأحمر والأخضر. اذا تزوجت إمرأة بها عمى الوان من رجل سليم البصر فما هو التوزيع المتوقع لسلامة البصر في : (أ) أبنائها - (ب) بناتها .

٢ ـ كم عدد أزواج الكروموسومات المتماثلة في الرجال؟

٣ ـ لخص التوازي في سلوك الجينات كما وصفه مندل وسلوك الكروموسومات أثناء الأنقسام الأختزالي والأخصاب .

٤ ـ قـد يـؤدي عـدم نجـاح الأنفصال الى تكوين زيجوت به XXY. ما هو جنس ذبابة الفاكهة التي تنشأ منه؟ وما هو جنس الأنسان الذي ينشأ منه؟

٥ ـ عندما يتم تهجين نبات طماطم طويل ثماره حمراء مع نبات طماطم قزم ثماره صفراء فأن كل أفراد الجيل الأول تكون طويلة - حمراء وعند التزاوج فيما بينها لا يظهر الا الـطرازين المـظهريين الأبويين في الجيل الثاني . ماذا تستنتج عن التحكم الوراثي لهاتين الصفتين؟

٦ ـ عرف الجين .

٧ ـ على الـرغم من أن نبـات البسلة به سبعـة أزواج من الكروموسومات إلا أن الدراسات الحديثة أوضحت أن ثلاثاً من الصفات السبع التي درسها مندل كانت فعلا على نفس الكروموسوم . كيف تعلل حدوث التوزيع المستقل في هذه الجينات؟

٨ ــ لسبب ما (غير مفهوم حتى الأن) تتكون أجنه أطفال ذكور أكثر مما تتكون أجنة أطفال إناث وعند مرحلة الطفولة يكون عدد الأولاد مساو لعدد البنات. هل يمكنك إقتراح سبب محتمل لتفسير نسبة الوفيات الأعلى (قبل وبعد الولادة) في المواليد الذكور؟

٩ ــ عند إجراء التلقيح الأختباري لكل من الهجن الثنائية الأتية أعطى النسبة المبينة أمامة من الأمشاج المستحدثة:

Aa	Xx	36 %	Aa	Bb	31 %
Aa	Yy	14 %	Xx	Yy	22 %
			Xx	Bb	5 %

من هذه البيانات حدد التتابع الخطى والتباعد النسبي لكل موقع جين على الكروموسوم.

١٠ ــ تنبأ بالجنس في بشر لهم التراكيب الكروموسومية الآتية (و جميعهم شوهدوا) :

XXXYY و XXYY و XXXXY و XXXY و XXXX و XYY و X و XXX و XXY

١١ ــ كم عدد أجسام بار التي تتوقع أن تجدها في كل من الأفراد في المسألة السابقة؟

REFERENCES المراجع

1. BERAN, A. G. and J.L. GERMAN III, "Chromosomes and Disease," Scientific American, Offprint No. 150 November, 1961. Describes the mechanisms by which certain chromosome abnormalities arise and the diseases that may result.
2. GABRIEL, M.L., and S. FOGEL, eds., Great Experiments in Biology, Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, N.J. This paperback contains several original papers on the chromosome theory, including the report by Harriet Crieghton and Barbara McClintock of their experiments.
3. MITTWOCH, URSULA, "Sex Differences in Cells" Scientific American, Offprint No. 161, 1963. Discusses the significances of the sex chromosomes and Barr bodies with normal and abnormal conditions.
4. MCKUSICK, V. A. "The Mapping of Human Chromosomes," Scientific American Offprint No. 1220, April, 1971.
5. RUDDLE, F.H. and R.S. KUTCHERLAPATI, "Hybrid Cells and Human Genes," Scientific American, Offprint No. 1300, July, 1974. How somatic cell hybridization enables linkage groups to be assigned to specific chromosomes.



CHAPTER 12 الباب الثاني عشر

الطبيعة الكيميائية للجينات
THE CHEMICAL NATURE OF GENES

CHAPTER SUMMARY	ملخص الباب
EXERCISES AND PROBLEMS	تمارين ومسائل
REFERENCES	المراجع

الباب الثاني عشر
الطبيعة الكيميائية للجينات

نشأت فكرة الجينات (و ان لم تكن بذلك الأسم) على يدي مندل في محاولة لشرح بعض قواعد الوراثة. ولم يحاول مندل تصور الجين كتركيب محدد في مكان محدد وله طبيعة كيميائية محددة وطريقة عمل محددة. ومع ذلك فبمجرد أن تأكد وجود الجينات على الكروموسومات فقد بدا من الممكن القيام بهذه المحاولة. فالكروموسومات تراكيب مرئية في مكان محدد ومن الممكن عزلهم من الخلية ودراسة تركيبهم الكيميائي.

١٢-١ . الحامض RNA: مادة الجينات

DNA : THE SUBSTANCE OF GENES

تتركب الكروموسومات في الكائنات حقيقية النواة من بروتينات نووية أي أنها تتكون مـن أحمـاض نوويـة وبروتينات. الحامض النووي الرئيسي هو DNA على الرغم من وجود كميات قليلة من الحامض RNA كذلك. أما البروتينات فهي خمسة أنواع قاعدية قوية من بروتينـات تسمى الهستونات histones و كمية مكافئة تقريبا من خليط غير متجانس من بروتينـات لاهستونيـة nonhistones. فأذا كانت الكروموسومات تحتوي على الجينات فهل تكون المعلومات الوراثية مختزنة في البروتينات أو الأحماض النووية أو في كليهما معا؟ في عام ١٩٢٨ قام عالم البكتيريا الأنجليزي فريد جريفيث بأكتشاف حينها تمت متابعته على مدى الأعوام الثلاثين التالية كشف أخيرا عن الأجابة.

تجارب جريفيث و أفرى THE EXPERIMENTS OF GRIFFITH AND AVERY

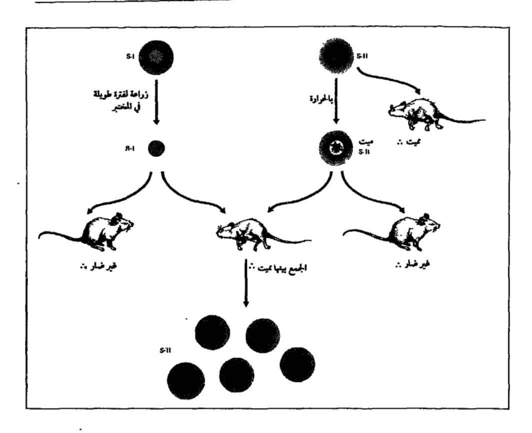
أستخدم جريفيث نوعا من البكتيريا يسبب الألتهاب الرئوي البكتيري وكان مرضا

شائعا و خطيرا قبل اكتشاف المضادات الحيوية . من أهم خصائص هذه البكتيريا وجود حويصلة صمغية مكونة من مركب عديد التسكر حول كل خلية . عندما تربي هذه البكتيريا فإن هذه الحويصلة تكسب المستعمرات مظهرا لامعا أملسا (الشكل ١٢-١) ولهـذا السبب يطلق على الخلايا أسم خلايا S "S cells". ومع ذلك عندما تطول زراعة هذه البكتيريا خارج العائل الحي فان بعض الخلايا تفقد القدرة على تكوين الحويصلة ويبدو سطح المستعمرات مجعد وخشن rough ويرمز لها بالحرف "R" ومع فقد القدرة على تكوين الحويصلة يفقد الكائن قدرته على إحداث المرض أي أن الخلايا R لا تسبب المرض.

الأسـم العلمـي لهـذه البكتيـريـا هـو نيـومـوكـوكسـاي *Pneumococci* و يوجد منها عدة أنواع هي I و II و III. الخ . وكل نوع ينتج النوع الخاص به من الكبسولة عديدة



الشكـل ١٢-١ . البكتيريا نيوموكوكساي نامية في مستعمرات على سطح وسط غذائي. أعلى: وجود حويصلة حول الخلايا البكتيرية يكسب المستعمرات مظهر لامع وأملس (S) أسفـل: البكتـيريـا بدون الحـويصـلات أنتج هذه المستعمرات الخشنة (R) مظهر الخلايا البكتـيريـة المتحوصلة وغير المتحوصلة يمكن مشاهدتها في الشكل ٢٤-٦. (الصور من بحوث الدكتورة هاربيت افروسي – تايلور – بتصريح من جامعة روكفيلر).



١٢-٢ . تجـربـة جريفيث. شيء ما في الخلايا S-II المقتولة حول الخلايا R-I الى خلايا S-II. هذا التغير الوراثي يسمى التحول. وقد ثبت في النهاية أن الحامض DNA هو المسئول عن هذا التحول.

التسكر التي يمكن تمييزها عما تنتجه الأنواع الأخرى. وعلى خلاف التحول أحيانا من S الى R فان نوع الكائن يكون ثابت. وحينما تحقن الفئـران ببضـع خلايـا S من أحد الأنواع وليكن النوع II فان أجسامهم تستشري فيها الخلايا المنحدرة من نفس النوع. فيما يخص النوع اذن نجد الاستمرارية في الصفات من جيل الى جيل تماما كما وجدنا في الخميرة.

وكما ذكـرنا سابقـا فـان الحقـن بخلايـا R يكون عادة غير ضار وكذلك يكون الحقن بخـلايا S اذا كانت قد قتلت مسبقا (بتعرضها لدرجة حرارة عالية مثلا). وعلى غير المتـوقع فقـد وجـد جريفيث أن حقن الفئران بخلايا R حية وخلايا مقتولة معا فان الفئران تمرض ويمكن استعادة خلايا S حية من أجسامهم. وعندما تعمق جريفيث في تتبع هذه الظاهرة الغريـبة أكتشـف أن نوع الخلايا S التي استعادها من الفئران يحدده نوع الخلايا S الميتة التي استعملها وليس نوع السلالة التي أخذ منها الخلايا R. بعبارة

أخرى عند حقن فأر بخلايا R حية من النوع I و خلايا S ميتة من النوع II فان الخلايا الحيه التي استعادها من جسم الفأر المريض كانت خلايا S من النوع II (الشكل ١٢-٢). أكثر من ذلك كان التغير من خلايا R-I الى خلايا S-II ثابت و وراثي . الخلايا S-II يمكن زراعتها الى ما لا نهاية وتظل محافظة على نوعها. من الواضح أن شيئا ما في الخلايا S-I الميتة قد حول الخلايا R-I الحيه الى خلايا S-II و أن هذا الشيء كان ينتقل من جيل الى جيل.

خلال سنوات قليلة كان هذا التحول transformation كما كان يسمى قد تم أجراؤه في أنابيب الأختبار. فقد تحولت نسبة ضئيلة من خلايا R-I نامية على حساء في أنبوبة أختبار ومضافا اليها خلايا S-II ميتة الى خلايا S-II. وفيما بعد أستعمل بنجاح مستخلص الخلايا S-I في تحويل خلايا R-I إلى خلايا S-II في أنبوبة الاختبار

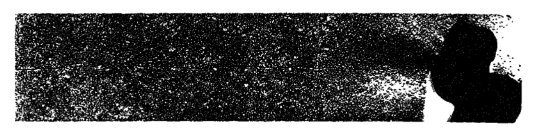
كما تتوقع فأن هذا المستخلص الخلوي كان يحتوي على العديد من المكونات بما في ذلك عديدات التسكر و البروتينات والليبيدات و الحامضين النوويين DNA و RNA. وبواسطة التحطيم الأنتخابي لهذه المكونات واحدا بعد الاخر و أختبار النشاط التحويلي للمواد المتبقية فقد أستطاع الدكتور أو. ت. أفري ومساعدوه في عام ١٩٤٣ اثبات أن العامل الفعال في التحويل هو الحامض DNA (الشكل ١٢ ـ ٣). **وقد حوّل الحامض DNA المستخلص من خلايا S-II بعد تنقيته الخلايا R-II إلى خلايا S-II . هذا إذن جزيء يغير وظائف الخلية التي يدخل اليها وفي هذه الحالة جعلها تنتج النوع II من الحويصلات بدلا من النوع I.**

هذا الجزيء كان يضاعف نفسه self-duplicating أيضا حيث أمكن أستخلاص كميات من الحامض DNA ذو النشاط التحويلي من نسل الخلايا المتحولة أكبر بكثير من الكمية المستعملة أصلا لأحداث التحول.

تجارب هرشي و تشيس على الفيروسات

THE VIRUS EXPERIMENTS OF HERSHEY AND CHASE

في عام ١٩٥٢ قام عالما الوراثة ا. د. هرشي و مارثا تشيس بسلسلة من التجارب على الفيروسات التي أدت إلى المزيد من الأدلة على أن الحامض DNA هو المادة

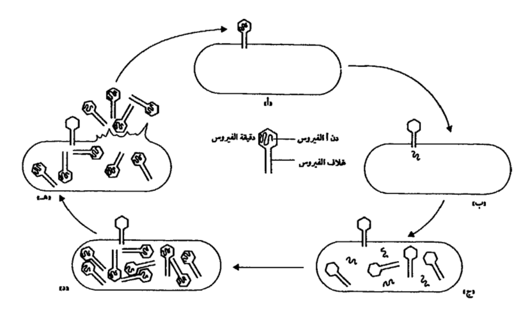


الشكـل ١٢-٣. صـورة بالمجهـر الأليـكتروني لجزيء الحامض DNA أثناء دخولة الى خلية نيوموكوكاس (الشيء الكبير الى اليمين). هذا الجزئي من الحـامض DNA (الخيط الطويل الرفيع) يبلغ طولة حوالي ٧ ميكرون وهو طول يكفي لاحتواء ١٢ جين. عملية التحول تحدث بعد دخول الجزيء الى الخلية البكتيرية. (٣٨٠٠٠ مرة - بتصريح من الدكتور الكسندر توماز).

الأساسية للوراثة. تشبه الفيروسات الكروموسومات الصغيرة من عدة نواحي. فهي أيضـا تكـون من بروتينـات نووية و عندما تدخل خلية العائل تبدأ هذه الخلايا في مضاعفة أعداد دقائق الفيروس كما لو كانت جينات أجنبية غازية قد سيطرت على نظام التحكم الوراثي العادي للخلية.

قـد تصـاب البكتيـريا بفيـروسـات تسمى البكتيريوفاج bacteriophages (أكلة البكتيريا) وقد لوحظت عملية الدخول تحت المجهر الأليكتروني و لا يدخل الى الخلية الا الجزء الداخلي فقط من الدقيقة الفيروسية (الشكل ١٢-٤). أما الجزء الخارجي أو غلاف الفيروس فيعمل على حقن الجزء المسبب للعدوى. وعلى أي حال فإن الجزء المحقـون يحتـوي على المعلومـات الـلازمة لتكوين فيروسات جديدة. ويسيطر الجزء المحقون على أليات الأيض في خلية العائل ويوجهها نحو تصنيع كل الوحدات اللازمة لتجمع العديد من الدقائق الفيروسية الجديدة وهذه تتحرر عندما تنفجر الخلية (الشكل ١٢-٤).

البكـتريوفـاج النـاتـج داخـل خلايا بكتيرية نامية على وسط غذائي مشع يكون هو أيضا مشع. فإذا كانت ذرات كبريت مشع موجودة في هذا الوسط فانها ستدخل في تركيب الغلاف البروتيني للبكتيريوفاج حيث أن اثنين من الأحماض الأمينية العشرين الموجودة في البروتينات تحتوي على ذرات كبريت ولن تصبح جزءا من الحامض DNA الخاص بالبكتيريوفاج لأنه لا يحتوي على ذرات كبريت. من ناحية أخرى فان ذرات الفوسفور المشع تدخل فقط في تركيب الحامض DNA لأنه وحده الذي يحتوي على ذرات فوسفور. عندما يسمح لبكتيريوفاج يحتوي على ذرات فوسفور مشعة بغزو بكتيريا غير مشعة فان



الشكل ١٢-٤. دورة العدوى في الخلايا البكتيرية بالبكتيريوفاج. بعد أن يلتحق الفيروس بخلية سليمة (أ) يحقنها بمحتوياته من الحامض DNA-(ب) تنتج جزيئات جديدة من الحامض DNA الفيروس وكذلك أغلفة بروتينية فيروسية جديدة (ج) من هذه تتجمع وحدات بكتيريوفاج قادرة على العدوي (د) وهي تتحرر عندما تنفجر الخلية البكتيرية (ه)

جميع الخلايا البكتيرية تصبح مشعة ومعظم هذا النشاط الأشعاعي ينتقل الى الجيل التالي من البكتيريوفاج. وعندما تصاب البكتيريا بفيروسات تحتوي على ذرات كبريت مشعة ثم يتم استبعاد الأغلفة الفيروسية (بالألتفاف السريع في خلاط كهربائي) فانه لا يمكن الكشف عن أي نشاط اشعاعي في الخلايا فقد أحتفظت به الأغلفة الفيروسية.

نستنتج من هذه التجارب أن جزء الحامض DNA من البكتيريوفاج هو الذي يتم حقنه في الخلايا البكتيرية أما الجزء البروتيني فيبقى خارجها والحامض DNA قادر برغم ذلك على توجيه عملية تكوين الدقائق الفيروسية الجديدة كاملة بما لها من أغفلة بروتينية. من الواضح أن الحامض DNA هو المادة الوراثية الأساسية أي مادة الجينات. وعلى ذلك يكون لزاما علينا أن نسأل: ما هي الخصائص التي تجعل الحامض DNA قادرا على :

(١) السيطرة على تخليق النوع II من عديدات التسكر أو الغلاف البروتيني للفيروس.
(٢) مضاعفة نفسه من جيل إلى جيل؟ تم التوصل أولا إلى اجابة الجزء الثاني من السؤال.

١٢-٢ . نموذج واتسون وكريك لحامض DNA
THE WATSON-CRICK MODEL OF DNA

عندمـا حدث اكتشاف أفري كان الحامض DNA أخر ما يخطر على البال كمستودع للمعلومات الوراثية. دعنا نستعرض ما كان معروفا عن هذا الجزيء. كما عرفنا في الباب الرابع فان الحامض DNA عبارة عن جزيء كبير وبوليمر. والتميوء الخفيف ينتج وحداته وهي النيوكليوتيدات nucleotides وعلى حين تتركب البروتينات من ٢٠ نوع من الأحماض الأمينية لا يوجد الا أربعة أنواع من النيوكليوتيدات في الحامض DNA. كل نيوكليوتيدة بها سكر خماسي الكربون (أي بنتوز pentose هو الدي أوكسى ريبوز deoxyribose . تتصـل مجموعة فوسفات وحيدة بذرة الكربون رقم ٥ في البنتوز (الشكل ١٢-٥) وتتصل قاعدة نيتروجينية بذرة الكربون رقم ١ . يحتوي الحامض DNA على أربعة أنواع من القواعد النيتروجينية إثنتان منها تسميان البيوريننات purines تتركبان من ذرات كربـون وذرات نيتروجـين مرتبطة مع بعضها في حلقتين وهذه هي الأدنين (A) adenine والجوانين (G) guanine (الشكل ١٢-٥). أما القاعدتان الأخريان فهما من البيريميدينات pyrimidines وحيـدة الحلقة السيتوزين cytosine (C) والثايمين (T) thymine .

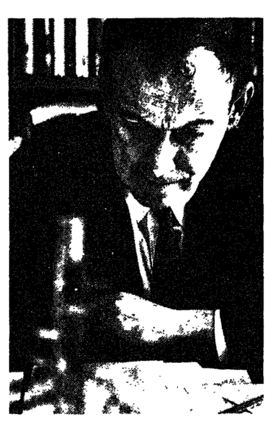
الشكل ١٢-٥ . تركيب النيوكليوتيدات التي تعمل كوحدات للحامض DNA.

خاصية أخرى ملفتة للنظر في الحامض DNA هي أنه مهما كانت كمية الأدنين في نواتج هضم الحـامض DNA من أي كائن فان كمية الثـايمـين تكـون مسـاوية لها (الشكـل ١٢-٦). وبالمثل مهما كانت كمية السيتوزين (وهي تختلف كثيرا من نوع الى آخر) فان كمية الجوانين تكون مساوية لها. وعندما إكتشفت هذه العلاقة لأول مرة كانت غير مشجعة إذ أنها أوحت بتركيب متجانس متكرر للجزيء وليس ذلك من قبيل ما يتمناه المرء في جزيء تختزن فيه المعلومات. فبينما تحتوي البروتينات المختلفة على ما يصل الى ٢٠ حامض أميني بنسب جزيئية شديدة التفاوت فـان الحامـض DNA لايحتوي إلا على أربعـة مكـونـات و إذا عرفت النسب الجزيئية لأثنين منهما (أحد البيورينات و أحد البيريميدينات) فأنك تعرف تلقائيا النسب الجزيئية للمكونين الأخرين. وهذا لا يعني أن الحامض DNA لا يستطيع تحويل المعلومات الوراثية الى شفرة فنظام مورس الدولي ليس به سوى ثلاث وحدات (شرطة ونقطة وسكون) ومع ذلك فانه بالوقت والصبر الكافيين يمكن تشفير محتويات مكتبة من أي حجم بواسطته.

وحتـى يمكـن التوصـل الـى كيفيـة قيام الحامض DNA بوظائفه (إختزان وتضاعف المعلومات) كان لابد من التوصل الى التركيب ثلاثي الأبعاد لهذا الجزيء. كان النجاح في هذه المهمة حليف عالمين يعملان في جامعة كامبرج بأنجلترا عام **١٩٥٣** وهما جيمس واتسون (الشكل ١٢-٧) و فرنسيس كريك. كانت المعلومـات لديهم هي ما سبق

الشكل ١٢-٦. **تختلف نسبة السيتوزين + الجوانين: الأدنين + الثايمين من كائن لاخر (خاصة بين بدائيات النواه) ولكن في حدود الخطأ التجريبي فان الأدنين = الثايمين والسيتوزين = الجوانين.**

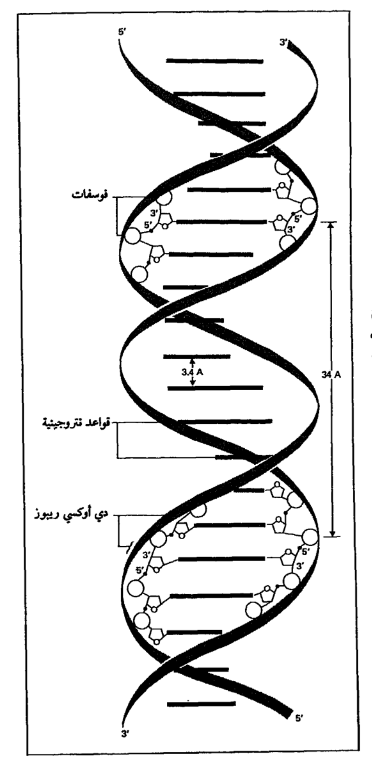
	الكميات النسبية (٪) للقواعد في الحامض DNA			
	أدنين	جوانين	سيتوزين	
الانسان	٣٠,٩	٢٩,٤	١٩,٩	١٩,٨
الدجاج	٢٨,٨	٢٩,٢	٢٠,٥	٢١,٥
النطاط	٢٩,٣	٢٩,٣	٢٠,٥	٢٠,٧
قنفذ البحر	٣٢,٨	٣٢,١	١٧,٧	١٧,٣
القمح	٢٧,٣	٢٧,١	٢٢,٧	٢٢,٨
الخميرة	٣١,٣	٣٢,٩	١٨,٧	١٧,١
بكتيريا القولون	٢٤,٧	٢٣,٦	٢٦,-	٢٥,٧



الشكل ١٢-٧. الدكتور جيمس د. واتسـون من معمل كولد سبرنج هاربور و أحـد مكـتشفي تركيب الحامض DNA. (الصـورة من تشـارلز هاربوت - ماجنم للتصوير).

شرحـه عـن التركيـب الكيميـائي للجـزيء وخبـرة بـزوايـا الـروابـط الهيدروجينيـة وربمـا الأهـم من كل ذلك صـور بالأشعة السينية للبللورات X-ray crystallography لتحضيـرات من الحامـض DNA وقد استعملا نماذج معدنية للنيوكليوتيدات ونجحا أخيرا في بناء نموذج للجزيء يفسر كل المعلومـات المعروفة عن الحامض DNA. ليس هذا فقط ولكن (كـما فطنـوا إلى ذلـك بسرعة) هذا النموذج قدم آلية تفسر خاصية مضاعفة جزيء الحامض DNA لنفسه. كان هذا هو نموذج واتسون وكريك (الشكل ١٢-٨). ومكافأة لهما على الأكتشاف الكبير فقد اقتسما جائزة نوبل في عام ١٩٦٢.

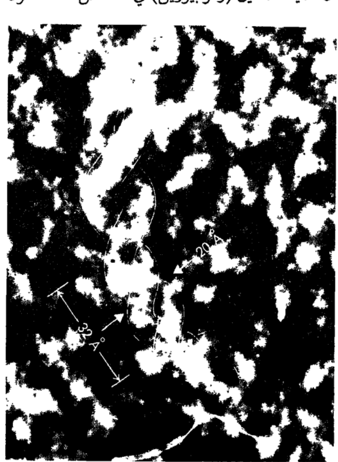
في نموذج واتسون وكريك يتكون الجزيء من سلسلتين عديد تي التسكر. يتكون العمـود الفقري لكل سلسلة من مجموعات متبادلة من السكر والفوسفات. مجموعة الفوسفات المرتبطة مع ذرة الكربون رقم ٥ من احدى وحدات السكر تكون مرتبطة تساهميا مع ذرة الكربون رقم ٣ من وحدة السكر التي تليها. تلتف سلسلتان من هذا النـوع حول بعضهـا البعض على هيئـة سلم حلزوني (الشكـل ١٢-٨). هذا هو الحلزون المـزدوج the doube helix . لاحظ أن سلسلتي الحلزون المزدوج تجريان في



الشكل ١٢-٨. نموذج واتسون وكريك للحامض DNA. يقع كل زوج من القواعد النتروجينية في مستوي عبر المحور المركزي للحلزون المزدوج. لاحظ أن خيطي الحامض DNA يجريان في اتجاهين متضادين أي أن أحدهما يجري في الاتجاه من ٣/ إلى ٥/ بينما يجري الآخر في الإتجاه من ٥/ إلى ٣/ كل خيط يكون لفة كاملة كل ٣٤ وحدة انجستروم. (معدل عن تمثيل تركيب الحامض DNA لمؤلفة ويليام أتكن في مجلة بيوسيانس العدد ٢٣ - نوفمبر ١٩٧٣ - صفحة ٦٥٣. بتصريح من المؤلف ومن المعهد الأمريكي للعلوم الأحيائية).

إتجاهين متضادين. وقد اصطلح على تجميع سلاسل الحامض DNA وقراءتها في اتجاه ذرات الكـربون من ٥َ إلى ٣َ. وفي الحلزون تجري أحدى السلسلتين في اتجاه بينما تجري زميلتهـا في الأتجـاه الأخـر (الشكل ١٢-٨) ولذلك يقال أن السلسلتين ضد متوازيتين antiparallel".

تبرز القواعد البيورينية المرتبطة مع وحدات السكر الخماسي نحو محور الحلـزون. وعند كل خطوة في هذا السلـم تبـرز قاعدتـان نحـو بعضهمـا فـي نفـس المستـوي . ويبلـغ قطـر الحلزون المزدوج ٢٠ وحدة أنجستروم (A) (الشكل ١٢-٩) . والآن عندما توجـد قاعـدتـان بيريميدين في نفس المستوي فانهما لن تغطيا المسافة بين العمودين الفقريين للسلم الحلزوني. ولن تستطيع قاعدتان من البيورين بما لهما من حجم أكبر أن تدخلا فـي مستوى واحـد داخل الحلزون المزدوج . ولكن قاعـدة بيورين واحدة وقـاعـدة بيريميدين واحـدة تكفيان بالضبط لملء الفـراغ المتاح. وقد لاحظنا سابقا أن كميـة الأدنين (وهو بيورين) في الحامض DNA تكون دائما مساوية لكمية الثايمين



الشـكـل ١٢-٩. الـرؤيـة المباشرة للتركيب الحـلزوني للحـامض DNA. أضيفت الخـطوط الى صورة المجهـر الأليكتروني لتجعل خيـطي الجـزيء أكـثـر وضـوحـا. (بتصريح من الـدكتور جاك جريفيث من مدرسة الطب بجامعة ستانفورد).

(وهو بيريميدين) كما أن كمية السيتوزين (وهو بيريميدين) تكون دائما مساوية لكمية الجوانين (وهو بيورين). وهذا يتفق بالتأكيد مع ضرورة تقابل بيورين دائما مع بريميدين حتى يتسع لهما الحلزون. ولكن لماذا لا يتقابل الأدنين مع السيتوزين والجوانين مع الثايمين؟ النظرة الفاحصة لشكل الجزيء في كل منهم تعطينا الأجابة. انها مسألة الفرص المتاحة لتكوين روابط هيدروجينية بين البيورين والبريميدين.

تذكر أنه حيثما تقترب ذرتان لهما سالبية كهربية عالية (و تتصل بأحداهما ذرة هيدروجين) تنشأ بينهما رابطة هيدروجينية. وضع مجموعتي C = O و N-H في الثايمين وكذلك مجموعة NH_2 - على إحدى ذرات النتروجين في حلقة الأدنين يكون بحيث اذا تقاربت القاعدتان من بعضهما تنشأ بينهما رابطتان هيدروجينيتان (الشكل ١٢-١٠). أما إذا حاولنا وضع الثايمين مع الجوانين فلا يمكن تكوين مثل هذه الروابط. عند وضع الجوانين مع السيتوزين في نفس المستوي فان التقارب بين ثلاثة أزواج من ذرات سالبية كهربية قوية يؤدي الى نشأة ثلاث روابط هيدروجينية بينها (الشكل ١٢-١٠).

وعلى ذلك يكون الشكل الهندسي والفرص المتاحة لتكوين الروابط الهيدروجينية

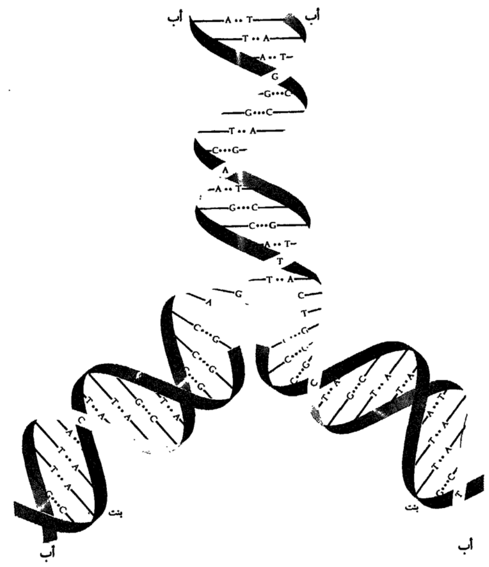
الشكل ١٢-١٠. أماكن الروابط الهيدروجينية بين الثايمين والأدنين وبين السيتوزين والجوانين. ان وجود هذه الروابط الهيدروجينية المتعددة (حوالي ٢٥ رابطة في كل لفة) هو الذي يكسب الحلزون المزدوج للحامض DNA هذا الاستقرار الكبير. على الرغم من أن أشكالهم مناسبة الا أن الثايمين لا يستطيع تكوين روابط هيدروجينية مع الجوانين كما أن السيتوزين لا يستطيع تكوين روابط هيدروجينية مع الأدنين.

الناجمة عنه هو الذي يفسر لماذا تكون كميـة الأدنين في الحامض DNA مساوية لكمية الجوانين. أزواج القواعد هذه فقط هي التي تربط أجزاء الحلزون مع بعضها. جزيء واحد من الحامض DNA قد يحتوي ما بين عدة مئات أو الآف الى مائة مليون من أزواج القواعد. وبينما تكون الرابطة الهيدروجينية المفردة ضعيفة جدا (أقل من ٥ كيلو سعر / مول) فأن التأثير الجماعي لرابطتين هيدروجينيتين أو ثلاث بين كل زوج من القواعد يكسب المركب قدرا كبيرا من الأستقرار.

١٢-٣. تضاعف الحامض DNA   DNA REPLICATION

يقدم نموذج واتسون وكريـك لجـزيء الحامـض DNA الأساس الجزيئي للخاصيتين المركزيتين للمعلومات الوراثية: وسيلة لأختزان المعلومات و وسيلة لعمل نسخ منها. التتـابع الخطى للقواعد الأربعة يمكن أن يكون هو جهاز تخزين المعلومات – شفرة مكونة من أربع وحدات أي بزيادة وحدة واحدة عما هو موجود في شفرة مورس. ولكن يجب أن تلاحظ أنه اذا كان ذلك صحيحا فان جزيء الحامض يحتوي على مجموعتين كاملتين من المعلومات المشفرة وذلك لأننا لو عرفنا تتابع القواعد على أحد الخيطين فان مباديء أزدواج القواعد يعطينا فورا تتابعهم على الخيط الأخر. مهما كان تتابع القواعد المـوجودة على أحد الخيطين فلابد أن يكون تتابع القواعد الموجودة على الخيط الأخر مكملا له complementary. العلاقة بين التتابعين تشبه العلاقة بين السالب و الموجب للصـورة الفوتوغرافية. هـذه البساطة في تركيب الحامض DNA تؤدي الى آلية لطيفة لتفسـير واحـدة من الخصـائص الجـوهـرية للمعلومات الوراثية الا وهي قدرتها على مضاعفة نفسها.

حسـب ما اقـترح واتسـون وكـريك فان تضـاعف الحـامض DNA «يبـدأ بفـك سـوستـة unzipping» الجـزيء «الأب» أي بكسر الـروابط الهيدروجينية بين أزواج القواعد ثم تمدد نصفي الجزيء الحلـزونيـيــن . وبمجـرد انكشـاف تتابـع القواعـــد على كل من الخيطين المنفصلين فانـه يعمـل كقالب template لتوجيه تراكم مجموعة القـواعـد المـكملـة لـه والتـي تلـزم لتخليـق خيـط جديـد. ويتـم تجميـع الخيـط الجديـد مـن واحـد دي–أوكسى ريبـونيـوكليوسايد ثلاثي الفوسفات deoxyribonuc-leosie triphosphate وكلما إتصلت نيوكليوتيدة بالسلسلة النـامية فانه يتم إستبعاد



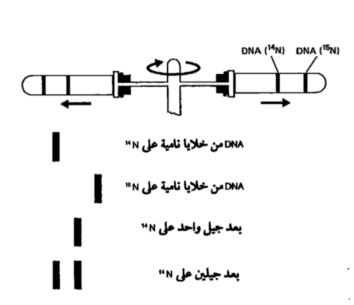
الشكل ١٢-١١. آلية تضاعف الحامض DNA. بعد انفصال خيطي الحامض DNA يعمل كل منهما كقالب يتجمع عليه خيط مكمل له وبهذه الطريقة يتم تخليق جزيئين من الحامض DNA مطابقين لبعضهما وللجزيء الأصلي. (مأخوذ من نظرة الى الحياة للوريا وجولد وسنجر - حقوق الطبع في ١٩٨١ - شركة بنيامين كمنز للنشر المحدودة - الرسم لجيورح كلات).

مجموعتي الفوسفات الثانية والثالثة (إرجع الى الشكل ٤-٢٩). الأنزيم المسؤل عن ربط الـنيوكليوتيدات مع بعضهــا في خيـط يسمـى DNA ploymerase. و تتجمــع النيوكليوتيدات في نظام مكمل لنظام القواعد الموجـود على الخيط الأبوى والذي يعمل كقـالب. على ذلك فان كل سيتوزين يعمل كقالب ينصب عليه جوانين من الخيط

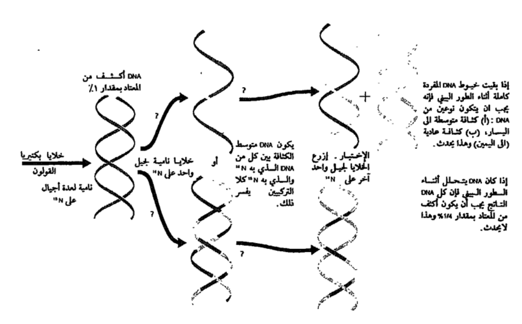
الجاري تخليقه و كل جوانين يعمل كقالب ينصب عليه سيتوزين من الخيط الجاري تخليقه وهكذا. وعندما تكتمل العملية يكون جزيئان من الحامض DNA قد تكونا وهما مطابقان لبعضهما تماما وللجزيء الأب (الشكل ١٢-١١).

اختبارات على نموذج واتسون وكريك TESTS OF THE WATSON - CRICK MODEL

في عام ١٩٥٨ تلقى هذا الأفتراض دعما تجريبيا قويا من دراسة م. س. ميزيلسون و ف. و. ستال. فقد استعملا بكتيريا القولون العادية *Escherichia coli* في تجاربهما. بكتيريا القولون يمكن أن تنمو على وسط غذائي يحتوي ببساطة على الجلوكوز وبعض الأملاح غير العضوية . لابد من وجود مصدر لذرات النتروجين ضمن هذه الأملاح وهي لازمة لتخليق البروتينات و الأحماض النووية. تؤدي أيونات الأمونيوم (NH_4^+) هذه المهمة بنجاح. على الرغم من أن أكثر نظائر النتروجين شيوعا هو ^{14}N فانه يمكن تخليق أيونات أمونيوم تحتوي على النظير الأثقل ^{15}N . في البداية قام ميزيلسون وستال بتربية بكتيريا القولون لعدة أجيال في وسط غذائي يحتوي على NH_4^+ وقد وجدا في نهاية هذه المدة أن الحامض DNA بالخلايا أثقل من المعتاد بسبب



الشكل ١٢-١٢. تجربة ميزلسون و ستال. تم استخلاص الحامض DNA المستخلص تبعا للمكان الذي يتراكم فيه بعد اللف في جهاز الطرد المركزي الشديد. تكوين طبقتين منفصلتين من الحامض DNA بعد جيلين في النتروجين العادي ^{14}N (أحداهما تكافيء كل ^{14}N والأخرى متوسطة الكثافة) يبين أن خيط واحد من الحامض DNA الثقيل (^{15}N-DNA) قد بقي متكاملا أثناء دورتين من دورات التضاعف (أنظر الشكل ١٢-١٣).



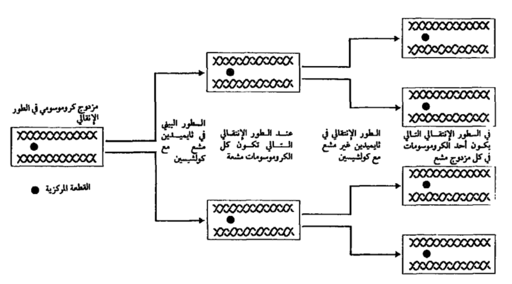
الشكـل ١٢-١٣. تفسير نتائج تجربة ميزلسون وستال. أثناء عملية التضاعف يظل كل خيط كاملا ويبني خيطا مكملا له من النيوكليوتيدات المتاحة. هذا يتمشى مع نموذج واتسون وكريك للحامض DNA.

إدماج ذرات ^{15}N فيـه (الشـكـل١٢-١٢) وبـعـد ذلـك نـقـلا الخـلايـا الـى وسـط يحتـوي علـى أيـونـات الأمـونيـوم العاديـة ($^{14}NH_4^+$) و سمحوا لها بالأنقسام مرة واحدة فقط. كان الحامض DNA في الجيل الجديد من الخلايا متوسط تماما في وزنه بين الحامض DNA الثقيل في الجيل السابق و الحامض العادي (الشكل ١٢-١٢). هذا في حد ذاته ليس غريبا ولا يدلنا إلا على أن نصف ذرات النتروجين في الحامض DNA الجديـد من النـوع ^{14}N والنصف الأخر من النوع ^{15}N ولا يعطينا أي فكرة عن ترتيبهم في الجزيء. ومع ذلك عندما سمـح للبكتيريـا أن تنقسـم مـرة أخـرى فـي وسـط بـه أيـونات أمـونيـوم عاديـة ($^{14}NH^+_4$) فقـد تكون وزنـان متميـزان مـن الحامـض DNA: كان وزن نصف الحـامض عاديا وكـان وزن النصف الأخر متوسطا (الشكل ١٢-١٢). وكما يتضـح مـن الشكل ١٢-١٣ فإن جزيئات الحامض DNA لاتتحلل ثم يعاد تشكيلها أثناء انقسام الخلية وبدلا من ذلك يظل كل خيط أصلي كاملا أثناء بناء الخيط المكمل له من النيوكليوتيدات المتاحة له. غالبا ما توصف هذه الطريقة لتضاعف الجزيئـات بأنهـا نصـف محافظـة "semiconservative" لأن كل جزيء من الحامض DNA نصفه قديم ونصفه الأخر جديد.

نظريـة واتسون وكريك عن الطريقة نصف المحافظة لتضاعف الحامض DNA تجد انعكاسا لها حتى على مستوي الكروموسومات المرئية. عندما تنمو القمم النامية لجذور النبـات في محلول يحتـوي علـى الثـايميـدين thymidine المشمع (وهو النيوكلوتيدة المحتوية على الثايمين T) تكتسب الكروموسومات في الخلايا المنقسمة بسرعة النشاط الأشعاعي بالتساوي وعند نقل هذه القمم النامية من المحلول المشع الى أخر غير مشع به الثـايميدين والكـولشيسـين يحدث التضاعف الكروموسومي بدون إنقسام الخلايا وبعد عملية تضاعف واحدة لاتزال الكروموسومات متساوية في النشاط الأشعاعي ولكن بعد عملية التضاعف الثانية تكون كروماتيدة واحدة فقط من كل كروموسوم مشعة والأخرى غير مشعة (الشكل ١٢-١٤).

تفاصيل النموذج DETAILS OF THE MODEL

التحليل الـدقيق لنـظام الـوراثة في بكتيريا القولون *E. coli* أثبت بوضوح تام أن الجينات فـي هذا الكائن موجودة في جزيء واحد دائرى من الحامض DNA يبلغ طوله

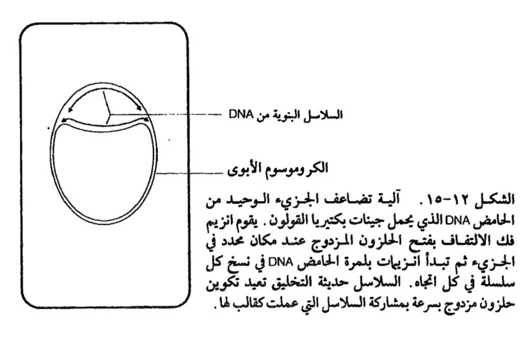


الشكـل ١٢-١٤. تضـاعف الكـرومـوسـومـات. النتـائـج توحي بأن: (١) كل كرومـوسوم (كـرومـاتيـدة) يتكـون من جزيئين و (٢) كل واحد من هذين الجزيئين يظل كاملا أثناء عملية التضاعف. التوازي بين هذه التجربة والتجربة المبينة في الشكل ١٢-١٣ يوحي بأن الجزيئين هما خيـطي جزيء DNA و أنهما ينفصـلان أثناء الطور البيني حسب نموذج واتسون وكريك. وليس معروفاً حتى الان كيفية تنظيم الحامض DNA في الكروموسوم. أجرى هذه التجربة الدكتور ج. هربرت تايلور.

حوالي ١مم (على الرغم من أن عرضه ٢٠ وحدة أنجستروم فقط!) وقد تم عزل هذا الجزيء فعلا من خلايا بكتيريا القولون. وقد يكون التعبير «أندفاع» أفضل من «عزل» لأن هذا الجزيء الذي يبلغ طولة ١ مم محشور في خلية لا يزيد طولها عن حوالي ٢ ميكـرون. في بكتـيريا القـولون إذن يكون الكروموسوم عبارة عن جزيء واحد من الحامض DNA. الكروموسومات في الكائنات الراقية تكون أكبر و أكثر تعقيدا بكثير. ومع ذلك فهناك دليل (بالاضافة الى دليل تايلور) أن الكروموسوم الواحد في الكائنات حقيقية النـواة يحتـوي فقط على جزيء واحـد متصـل من الحـامض DNA. أكـبر الكروموسومات في ذبابة الفاكهة مثلا يحتوي على جزىء واحد من الحامض DNA به حوالي ٦٥ مليون من أزواج القواعد و إذا تمدد هذا الجزيء بالكامل يصل طوله الى ٢ر٢ سم.

كل من الكائنات بدائية النواة والكائنات حقيقية النواة تستعمل (على الأقل) ثلاثة أنواع مختلفة من إنزيمات بلمـرة الحامـض DNA لكي يتم تضاعفه وبالأضافة الى هؤلاء يستعمل أيضا عشرة انزيمات أخرى في هذه العملية. إنزيمات بلـمرة الحـامض DNA لا تستطيع أن تستعتمـل كقالـب إلا خيـوط مفـردة مـن الحـامض (ss DNA) . single-stranded هـذا يعنـي أنـه قبل أن يتضاعف جزيء من DNA لابد من انفصال سلسلتيه ولكن كيف لك أن تفك إلتفاف جزيء قد يصل طولة إلى ٢ر٢ سم ويحتوي على أكثر من ٦ ملايين لفة؟ تم اكتشاف إنزيم خاص بفك الالتفاف و هو يقوم بفك إلتفـاف الحلزون المـزدوج الأبـوى ولكن حالما تنفصل السلسلتان لمسافة قصيرة تبدأ إنزيمات البلمرة في أداء عملها. وكلما تكونت سلسلة بنوية فانها تعيد تكوين حلزون مزدوج مع السلسلة التي عملت كقالب لها. بهذا الأسلوب تسرى موجة من التضاعف دائـما عنـد نقطة محددة على الكروموسوم وتتقدم في الأتجاهين على طول الكروموسوم الحلقي (الشكـل ١٢-١٥). ولا تستغرق العملية كلها سوى ٤٠ دقيقة في بكتيريا القولون. اذا بدأ التضاعف في أحد كروموسومات ذبابة الفاكهة عند مكان واحد فانه سوف يستغـرق أسبوعين لأتمام العملية. ولكن تضاعف الحامض DNA يبدأ في نفس الوقت عند حوالي ٦٠٠٠ مكان على كروموسوم ذبابة الفاكهة ويكتمل فيما يزيد قليلا عن دقيقتين.

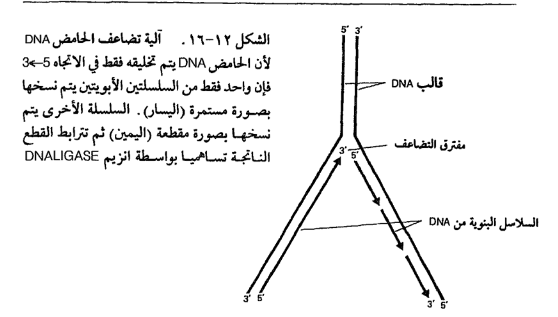
جـميـع إنزيمـات بلمـرة الحامض DNA التي تم إكتشافها تجمع السلاسل الجديدة



الشكـل ١٢-١٥. آليـة تضـاعف الجـزيء الـوحيـد من الحامض DNA الذي يحمل جينات بكتيريا القولون. يقوم انزيم فك الالتفـاف بفتـح الحلزون المـزدوج عنـد مكان محدد في الجـزيء ثم تبـدأ انـزيمات بلمرة الحامض DNA في نسخ كل سلسلة في كل اتجاه. السلاسل حديثة التخليق تعيد تكوين حلزون مزدوج بسرعة بمشاركة السلاسل التي عملت كقالب لها.

في الأتجاه ٥ـ ← ٣ـ أي تقرأ القالب في الأتجاه ٣ـ ← ٥ـ ولكن ذلك يعني أنه عندما ينفك التفات الجزيء الأبوى فانه يمكن نسخ سلسلة واحدة بدون انقطاع بواسطة إنـزيم البلمـرة كلمـا تقـدم نحـو «مفترق» fork التضاعف (الشكل ١٢-١٦). السـلسـلة الأبوية الأخرى لابـد من نسخهـا بطريقـة غيـر مستمـرة discontinu-ously عندما ينفك التفات ما يكفي من الحلزون المزدوج يتقدم إنزيم البلمرة بعيدا عن مفـترق التضـاعف (وبـالتـالي في الأتجـاه ٣ـ-٥ـ) ويعمـل على تخليق قطعـة من النيوكليوتيدات وكلما استمر فك إلتفات الجزيء الأبوى يرتبط جزيء أخر من انزيم البلمرة خلف الجزيء السابق ويبدأ في تخليق قطعة أخرى من النيوكليوتيدات (الشكل ١٢-٦). عندئذ يقوم إنزيم DNA ligase بلحام القطع في سلسلة بنوية متصلة.

تمت دراسة تركيب الكروماتين (كروموسومات الكائنات حقيقية النواة في صورتها المتمددة أثناء الطور البيني) بعدة طرق. ودراسة الكروماتين من عدة أنواع من الخلايا بالمجهر الأليكتروني كشفت عن ترتيب خطى لتراكيب كروية تسمى الأجسام النووية nucleosomes يصل بينها خيط رفيع (الشكل ١٢-١٧). ولأسباب واضحة تم تشبيه هذا الترتيب بحبات الخرز المرتبطة بخيط. يبدو أن هذه الحبات (الأجسام النووية) تتركب من جزيئين كل منهما يتكون من أربعة أنواع مختلفة من الهستونات يغلفها حلزون مزدوج من الحامض DNA يبلغ طولة حوالي ٢٠٠ من أزواج القواعد. أما الخيط فيبدو



الشكل ١٢-١٦ . آلية تضاعف الحامض DNA
لأن الحامض DNA يتم تخليقه فقط في الاتجاه 5→3 فإن واحد فقط من السلسلتين الأبويتين يتم نسخها بصـورة مستمرة (اليسار) . السلسلة الأخرى يتم نسخهـا بصورة مقطعة (اليمين) ثم تترابط القطع النـاتجـة تسـاهميـا بواسـطة انزيم DNALIGASE

أنه حلزون مزدوج من الحامض DNA مرتبط مع نوع خامس من الهستونات و بروتين أخـر من غير الهستـونـات . ولاتزال تفاصيل كيفية قيام مثل هذا التركيب المتجانس بالتعبير عن ا لمعلومات الوراثية في إنتظار المزيد من البحوث .

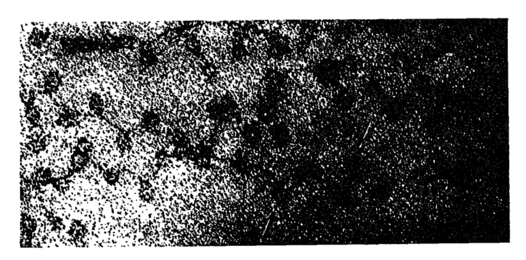
إصلاح الحامض DNA — DNA REPAIR

إن تـركيـب الجـزيء DNA لايسمح فقط بالتضاعف الذاتي الدقيق و إنما يكون مناسباً أيضاً للحفاظ على تتابع القواعد التي يحتوي عليها لأمد طويل . لأن كل سلسلة في الجـزيء DNA مكملة للسلسلة الأخرى فان المعلومات الموجودة في واحدة تكون مشفرة أيضاً في الأخرى . فإذا ما حدث لسبب ما أي خلل في تتابع القواعد الموجودة على إحدى السلسلتين فإن الرسالة الصحيحة ما زالت تحددها السلسلة المكملة لها . وفي الواقع فإن الخلايا تستفيد من هذه الميزة لتصحيح الأخطاء التي تحدث في الحامض DNA الموجـود بهـا . فبـواسطـة واحـد من إنـزيمـات البلمـرة (يسمـى بوليميريـز ١ polymerase I في بكتيريا القولون وبوليميريز بيتا polymerase B في الكائنات حقيقية النـواة) تقـوم الخلايا باستبعاد القواعد التالفة أو غير الصحيحة من إحدى سلسلتي الجـزيء ثم يتم إحـلال القواعد الصحيحة محلها - أي القواعد التي تكون مكملة للقواعد الموجودة على السلسلة المقابلـة . ويقـوم إنزيم DNA ligase بلحام الجزء الذي تم إصلاحه من النيوكليوتيدات ضمن الجسم الرئيسي للسلسلة .

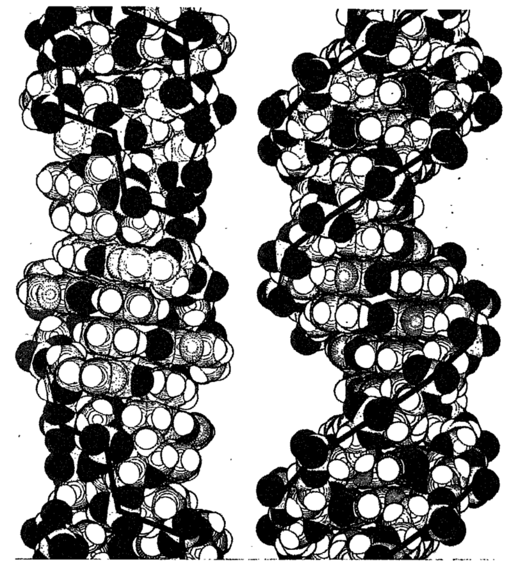
الأمانـة في تضاعف واصلاح الحامض DNA تضفى استقرارا كبيرا على الجينات. دعونا نتفحص حالـة حيـة لأستقرار المعلومات المشفرة في الحامض DNA. في السنوات الأخـيرة كشفت الدراسات عن وجود ثمانية الاف شخص في جنوب أفريقيا ضحايا لأحـدى العلـل الأيضيـة المتـوارثـة التـي تسمـى بورفـيريا porphyria. في هؤلاء الأشخـاص لا يتم أيض البـورفـيرينـات النـاتجـة من تكسير الهيموجلوبين و أنواع السيتوكروم. و يتم توارث هذا المـرض عن طريق جين سائد على أحد الكروموسومات الذاتية. ومعظم المرضى من سكان جنوب أفريقيا والباقون كانوا قد هاجروا منها. بل إن كل واحد من هذا الحشد الضخم يمكن تتبع أصله حتى يصل نسبه إلى واحد من أربعـة أشخـاص. هؤلاء الأربعـة هم من بين ثمانية أطفال أنجبتهم أريانتي جانس وزوجها جيريث جانس وهما مهاجران هولنديان تزوجا في جنوب أفريقيا عام ١٦٨٨. من البديهي أن أريانتي أو جيريث كان يحمل الجين المعيب و انتقل منه الى أربعة على الأقل من أبنائه ومنهم انتشر بدون تغير في الأجيال المتزايدة اللاحقة.

١٢-٤. الحامض DNA الأعسر LEFT - HANDED DNA

في عام ١٩٧٩ إكتشفت مجموعة من العلماء في معهد ماسا شوستس للتكنولوجيا أن



الشكـل ١٢-١٧. الكروماتين من نواة خلية دم حمراء في الدجاج. تشير الأسهم الى الأجسام النووية (نيوكليوسومات) التي تتكون من قلب من جزيئات الهستون مغلف بالحامض DNA. الخيط الـذي يربط بين الأجسام النووية يتكون من الحامض DNA وربما كان مرتبطا مع نوع واحد من الهستونات و بعض البروتينات غير الهستونية. (بتصريح من دونالد إي. أولينز و آدال. أولينز - جامعة تنيسي).



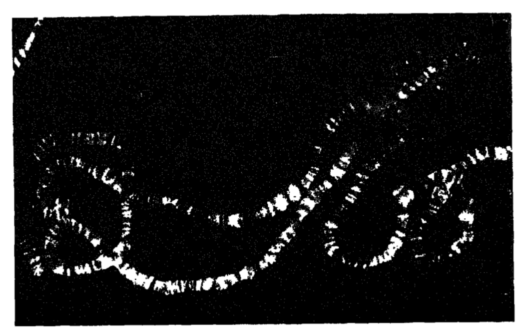
الشكل ١٢-١٨ . نماذج للحامض DNA الأعسر (Z-DNA) الى اليسار و الحامض DNA الأيمن (B-DNA) الى اليمين . الخط السميك يصل بين مجموعات الفوسفات المتجاورة في كل خيط . قام ج . ج . كيجلي بتطوير برنامج الحاسب الآلي الذي صمم هذين النموذجين في معهد ماساشوستس للتكنولوجيا بتصريح من أ . ريتش - مجلة ساينس العدد ٢١١ في ٩ يناير ١٩٨١).

الحامض DNA قد يوجد في صورة حلزون مزدوج أعسر (أي التفافه نحو اليسار) . لقد أجـروا تصويرا بللوريا بالأشعة السينية على بللورات تخليقية من الحامض DNA بها قواعـد الجوانين والسيتوزين في ترتيب تبادلي . وعند تحليل الأنماط الناتجة تبين وجود حلزون ولكنه يختلف عن نموذج واتسون وكريك في أن خيوطه تلتف في اتجاه مضاد

لأتجاه عقارب الساعة (الشكل ١٢-١٨) . الحلزون المزدوج لهذا الحامض DNA الأعسر (ويسمى Z-DNA) يكون أكثر إستطالة بقليل من الحلزون المزدوج في نموذج واتسون وكريك: يبلغ قطرة ١٨ وحدة انجستروم (بدلا من ٢٠) ويكون كل ١٢ من أزواج القواعد لفة كاملة (بدلا من ١٠).

يثـور السـؤال فوراً: هـل يوجـد الحـامض DNA الأعسر في الخـلايا؟ بإستعـمال الأجسام المضادة antibodies (راجع الباب ٢٤) التي تلتحم مع Z-DNA وليس مع الحـامض DNA العـادي (الـذي يسمـى "B" DNA) تمكن الكسنـدر ريتش وديفيد ستولار و مساعدوهما في معهد ماسا شوستس للتكنولوجيا و جامعة تفتس من إيضـاح أن الكروموسومات العملاقة في ذبابة الفاكهة تحتوي على كميات كبيرة من Z-DNA. يتركز الحامض Z-DNA أساسا في الشرائط البينية أي المناطق التي توجد بين الشرائط الداكنة (الشكل ١٢-١٩).

هناك دليل على أنه عند أضافة مجموعات الميثيل ($-CH_3$) الى الجوانين والسيتوزين في



الشكل ١٢-١٩. صورة فلورستية مجهرية توضح وجود الحامض (Z-DNA) في الكروموسومات العملاقة في ذبابة الفاكهة. عولجت الكروموسومات بأجسام مضادة من أرنب اكتسب مناعة بالحامض Z-DNA ثم صبغ بصبغة تجعل الأجسام المضادة من الأرنب تتألق. يبدو الحامض Z-DNA وقد تركز في الشرائط البينية و ان كان بعضه يوجد أيضا في الشرائط كذلك. (بتصريح من ب. دافيد ستولار من أ. نوردهايم و آخرين - مجلة ناتشر العدد ٢٩٤ ص. ٤١٧ - ١٩٨١).

الحامض DNA فإنها تدفعه إلى التحويل من الإتجاه اليميني للإلتفاف إلى الشكل الأعسر ويبدو أن المشتق الميثيلي من الحامض DNA يكون خاملا في الخلايا وربما كانت هناك علاقة بين هذا التحول المتبادل بين هذين الشكلين للحامض DNA وبين نشاط الجينات أو توقفها عن النشاط. ومطلوب المزيد من البحوث في هذا الصدد.

١٢-٥. الطفرات MUTATIONS

على الرغم من أن نظام الجزيء في الحامض DNA يجعله شديد المقاومة لحدوث تغيرات في تتابع القواعد الا أن هذه التغيرات تحدث بالفعل. مثل هذه التغيرات تسمى الطفرات الجينية أو طفرات النقط gene or point mutations الجين الخاص بالهيموفيليا الذي أنعمت به الملكة فيكتوريا على كل هذا العدد من أفراد البيوت الملكية في أوروبا نشأ تلقائيا. وتسميتنا للطفرة بأنها تلقائية يعني اعترافنا بأننا لانعلم شيئا عن سبب حدوثها. ومع ذلك فاننا نعرف الكثير عن عدد من العوامل التي تسبب حدوث الطفرات.

مسببات الطفرة : الأشعاع MUTAENIC AGENTS : RADIATION

في عام ١٩٢٧ سجل عالم الوراثة هـ. ج. مولر أنه تمكن من زيادة معدل الطفرة في ذبابة الفاكهة بمقدار ١٥ ضعف وذلك بتعريضها للأشعة السينية. ومنذ ذلك الحين وجدت أنواع من الاشعة قصيرة الموجة مثل أشعة جاما تحدث الطفرات. وحتى الأشعة فوق البنفسجية تحدث الطفرة اذا ما تمكنت من النفاذ الى الكروموسومات.

كيفية احداث الأشعة للطفرات ليست مفهومة بالكامل. الأشعة فوق البنفسجية يمكنها احداث كسور في خيوط الحامض DNA كما يمكنها أن تتسبب في تكوين روابط تساهمية بين قواعد الثايمين والثايمين وكذلك بين السيتوزين والثايمين إما المتجاورة على نفس الخيط أو عبر السلم. اصلاح مثل هذه العيوب قد يؤدي الى نقل في القواعد (مثلا من سيتوزين – جوانين الى ثايمين – أدنين) وبالتالي الى تغير في الشفرة الوراثية. أما الاشعة السينية فيحتمل أنها تتسبب في كسور بالحامض DNA و من المؤكد أنها تسبب كسورا مرئية في الكروموسومات.

الى أي حد تكون الطفرات هامة؟ من أجل الاجابة على هذا السؤال لابد أن نفرق بين الطفرات التي تحدث في الأعضاء التناسلية حيث تنتج الحيوانات المنوية

والبويضات وبين تلك الطفرات الجسدية التي تحدث في الأجزاء الأخرى من الجسم. الطفرة في خلية منشئة لخلايا الدم قد تقتلها أو توقف قدرتها على الأنقسام غير المباشر أو حتى تحولهـا إلى قضية سرطانية. ورد فعل الجسد للأشعة ـ على الأقل عند الجرعات المـرتفعة نسبيا – معروف جيدا فهو يشتمل على مثل تلك التأثيرات كارتفاع إحتمال الاصابة بسرطان الدم وهو زيادة سرطانية في خلايا الدم البيضاء. هذه المعلومات منتقاة من دراسات دقيقة أجريت على الناجين من هيروشيما و ناجازاكي والناجين من عدة حوادث تعرض لمستويات عالية من الأشعاع الذرى.

هناك عدة وحدات مستعملة لوصف جرعات الأشعة. الوحدة الأساسية للأشعاع هي الرونتجن (r) roentgen وهي مأخوذة من اسم مكتشف الأشعة السينية. وحيث أن الأنواع المختلفة من الأشعة تختلف عن محتواها من الطاقة وفي تأثيرها على الأنسجة البشرية فاننا نستعمل وحدتين تربط بينهما علاقة. هاتان هما الراد rad و الرم rem (وهي الحروف الثلاثة الأولى مـن roentgen-equivalent-man) وبالنسبة للأنواع التي سوف نتحدث عنها من الأشعة فانه يمكن اعتبار الوحداث الثلاث متكافئة.

إن جرعة مقدارها ٥٠-١٠٠ راد موزعة على كل أجزاء الجسم تجعله يشعر بالأعياء ونصف الناس الذين يتعرضون لجرعة مقدارها ٤٠٠-٥٠٠ راد سوف يموتون واذا بلغ مجمل تعرض الجسم ما دون ٢٥ راد تبدو عليه تأثيرات مرئية. ويكون تأثير الاشعاع على الخلايا الجسدية أقوى ما يمكن في الأنسجة التي يحدث بها الانقسام غير المباشر كثيرا. وعلى ذلك فالجلد وبصيلات الشعر وبطانة الأمعاء ونخاع العظم (حيث تتكون خلايا الدم) هي أكثر الأنسجة تعرضا للتلف.

وبينـما قد تؤدي الجرعات الأقل من القاتلة الى تقصير فترة الحياة أو قد تؤدي الى حدوث السرطان الا أن تأثير الأشعاع على الخلايا الجنسية له اعتبار خاص. فالطفرات في خلايا الجسد تموت بموته ولكن الطفرات في الخلايا الجنسية قد تنتقل الى أجيال المستقبل من خلال الحيوان المنوي أو البويضة. في مثل هذه الحالة سوف يكون الجين المتطفر موجودا في جميع خلايا النسل. وعلى حين يكون جمع معلومات مؤكدة صعبا فانه يمكن القول بأن جرعات الأشعاع التي ليس له أي تأثيرات جسدية مرئية مطلقا تكون قادرة على إحداث الطفرات في الخلايا الجنسية.



SOURCE	DOSE (MREM/YR)
NATURAL BACKGROUND	102
FALLOUT	4
NUCLEAR POWER INDUSTRY	0.003
MEDICAL USES	73
OTHER	3
TOTAL	182

الشكل ١٢-٢٠ . تقدير الجرعة السنوية من الاشعاع على أعضاء التناسل .

جزء لايستهان به من حالات التعاسة الطبية التي يتعرض لها البشر يمكن إرجاعه إلى عيوب وراثية . لذلك كان من الضروري أن نعلم كل ما نستطيع عن معدلات الطفرة وما هو تأثير الأشعاع عليهـا . في الشكل ١٢-٢٠ يوجد جدول يعطي تقديرات عن جرعات الأشعة السنوية التي تتعرض لها الأعضاء الجنسية لمواطن عادي من الولايات المتحدة الأمريكية (أي من غير علماء الأشعاع) . وقد تجد من المفيد دراسة هذا الجدول للحصول منه على أفكار عن الطرق التي يمكن بها تقليل فرص تعرض البشر للأشعاع إلى أدنى حد ممكن .

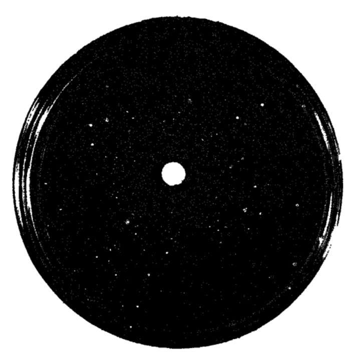
مسببات الطفـرة : المـواد الكيميائية MUTAGENIC AGENTS: CHEMICALS

هناك أيضا عدد من المواد الكيميائية التي تسبب حدوث الطفرة . أول مركب محدث للطفـرة يكتشف كان غاز المسـطـردة mustard gas الـذي إستعمـل فـي الحـرب العالميـة الأولى . هذه المواد وكثيـر من أمثالهـا تضيـف مجموعـات محتويـة على الكـربون (مثـل – CH_3 أو – CH_3-CH_2) الى جزيئات عضوية أخرى وهي عملية تسمى الألكلة

alkylation. حدوث الألكلة في قواعد الحامض DNA يمكن أن يسبب فجوات في الخيط فاذا ما إمتلأت مثل هذه الفجوات بالقواعد غير الصحيحة فأن الشفرة الوراثية تتبدل. هناك عدد من الجزيئات الأخرى التي تقلد القواعد العادية قد تندمج في الحامض DNA و تؤدي الى تغيرات في الشفرة الوراثية. يبدو أن جزيء الكافايين caffeine أحد هذه الجزيئـات. عدد كبير من المواد الهيدروكربونية مثل بنزوبيرين benzopyrene يسبب الطفرات. وفي أغلب الحالات لا تكون طريقة عمل هذه المواد واضحة.

يقدر أن الصناعات الكيميائية تنتج الآن حوالى ٥٠٠٠٠ مادة كيميائية مختلفة وتزداد القائمة في الطول كل سنة. هل كل هذه المواد غير ضارة؟ من الواضح أن بعضها ليس كذلـك. فعنـدمـا يتم طلاء بعضهـا على جلد حيوانـات التجـارب فانها تسبب له السرطان. وعندما تتم تغذية حيوانات التجارب على بعض هذه المواد فانها لاتتسبب في حدوث السرطان فقط وإنما تؤدي كذلك الى عيوب في المواليد. وعندما يتضح من هذه الاختبارات أن مادة كيميائية تتسـبب بقـوة فـي حـدوث السرطـان carcenogenic أو تنشـأ عنها عيوب في المواليـد teratogenic فان الجهود تبذل لاحلال مادة أخرى أكثر أمانا محلها. ولكن مشكلة إختبار كل المواد التي نتعرض لها مشكلة هائلة و الاختبارات على الحيوانات بطيئة (قد يستغرق ظهور السرطان في الفئران ثلاث سنوات) وليست حساسة بالقدر الكافي. لهذه الأسباب هناك حاجة ملحة لايجاد إختبارات بديلة تكون سريعة و غير مكلفة وحساسة. وأختبار إيمز the Ames test الذي سمي على أسم العالم الذي توصل إليه هو أحد هذه الاختبارات.

يقوم إختبار إيمز على إفتراض أن أي مادة كيميائية تسبب الطفرات يحتمل أن تسبب السرطان أيضا وقد تؤدي كذلك الى إحداث عاهات بالمواليد. ولذلك فان اختبار أيمز هو اختبـار لمسببـات الـطفـرة. والكـائن الأختبـاري هو أحـد سلالات السـالمونيلا تايفيمـوريم *Salmonella typhimurium* وهي البكتـيريا التي كثيرا ما تسبب النزلات المعـوية في البشر. وتستعمـل سلالـة متـطفرة غير قادرة على تخليق الحامض الأميني هيستيدين histidine من المـواد البسيطة في وسطها الغذائي. (وعلى ذلك فهي كائن متطفر ذو نقص غذائي مثل أولئك الذين وصفناهم في القسم ٩-٤). يستغل أختبار إيمز حقيقة أن الجينات يمكن أن تتطفـر من حالة النقص الى حالة الأكتمال الوظيفي وبالعكس. وعلى ذلك فانه عندما تتعرض البكتيريا المتطفرة الى أحـد مسببات الطفرة



الشكل ١٢-٢١. اختبار ايمز. زرع معلق من البكتيريا سالمونيلا تايفيموريم تحتاج الى هيستيدين على أجار مخلوط بأنزيمات كبد الفأر وينقصه الهيستيدين (الشكل ١٢-٢١). قرص ورق الترشيح في الوسط به ١٠ ميكروجرام من ٢-أمينوفلورين وهي مسبب معروف للسرطان. تسبب تأثير المادة في اعادة اكتساب الكثير من البكتيريا لقدرتها على النمو بدون هيستيدين وتكوين مستعمرات حول القرص. المستعمرات المتناثرة بالقرب من حافة الطبق تمثل بكتيريا مرتدة تلقائيا (أعيدت طباعته بتصريح من ب. ن. إيمز و ج. مكان و إي. ياماساكي - مجلة بحوث الطفرة : ٣١ : ٣٤٧ - ١٩٧٥).

فان الجين المتطفر في بعض الكائنات سوف يرتد في طفرته ويصبح مرة أخرى فعال وظيفيا. هذه الكائنات المرتدة revertants تكون قادرة على النمو في وسط غذائي ينقصه الهستدين (الشكل ١٢-٢١) وهو دليل واضح على أن الطفرة قد حدثت.

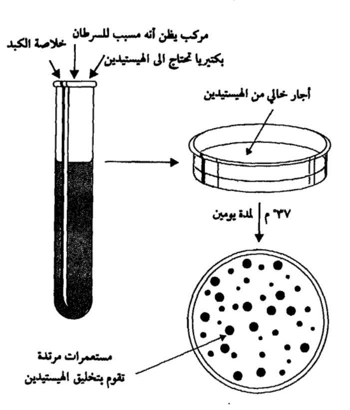
وقد عرف منذ عدة سنوات أن الكثير من المواد الكيميائية ليست مسببة للطفرة عندما تدخل في عمليات الأيض بالجسم. هذا التحول غالبا ما يتم في الكبد ولهذا السبب يشتمل إختبار إيمز على خليط من أنزيمات الكبد (الشكل ١٢-٢١).

و بفضل العدد الكبير من الكائنات المستعملة و سرعة نموها يمكن إنجاز إختبار إيمز في يومين وبتكاليف قليلة للغاية. وقد تبين حتى الأن أن حوالي ٩٠٪ من المركبات التي سبق أن ثبت أنها مسببة للسرطان تكون مسببة للطفرة في إختبار إيمز. بالأضافة الى ذلك فان عددا من المواد الكيميائية التي لم يشك فيها أحد من قبل كمسببات للسرطان قد أعطت نتائج إيجابية عند اختبارها وفيما بعد تبين أن بعضها قادر على

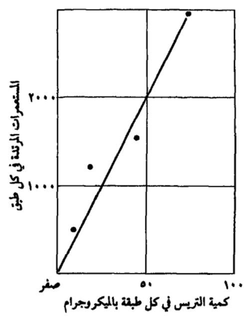
احـداث السرطـان في الحيوانـات المعملية. في السبعينيات إرتـدى ملايين الأطفال بيجامـات ومـلابس نـوم معالجـة بمادة مضـادة للحريق تسمى تريس Tris وقد أدى ثبوت أن هذه المادة مسبب قوي للطفرة في اختبار إيمز إلى سحبها من الأسواق وكذلك تم سحب بعض المواد التي تضاف الى الأغذية وبعض مكونات مستحضرات التجميل بعد أن ثبت نشاطها في اختبار إيمز.

من الواضح أنه لابد لنا من تجنب التعرض غير اللازم لمسببات الطفرة. ومن ناحية أخرى فان اهتمامنا الحقيقي كمواطنين لا ينبغي أن يعمينا عن تقدير ما للطفرات من أهمـية أحـيـائية فـي إحـداث التـطـور وكـأداة فـي غايـة الأهمـيـة فـي اكتشـاف المزيد عن علم الوراثة وما اكتشاف الأرتباط مع الكروموسوم X الذي ناقشناه في الباب السابق الا مثال واحد لدور الجينات المتطفرة في توضيح آليات التوارث.

كذلك كان للجينات المتطفرة أهمية كبيرة في التوصل الى مفاتيح للطرق التي تنتج بها الجينـات الـطرز المظهرية. فالعيون الحمراء والأغلفة عديدة التسكر والدم الذي لا يتجلط والاندوسبرم الشمعي وغيرها لا تتكون من الحامض DNA وانما هي ببساطة تعبير



الشـكـل ١٢-٢٢. باستعمال عدة تركيزات من المادة المراد اختبارها هذه الطريقة لاختبار ايمز تعطي تقديرا كميا لقدرة المادة على احـداث السرطـان (أنـظر الشكل ١٢-٢٣). الطريقة المبينة في الشكل ١٢-٢١ تعـطي تقـديرا كيفيا - وان كان مرئيا.



الشكـل ١٢-٢٣. قدرة مادة تريس [تريس (٢، ٣-ثنـائي برومـوبـروبيـل) فوسفـات] على احداث الطفرة وهي مادة مقاومة للحريق كانت تستعمل بكثرة في صنـع بيجـامـات الأطفـال في السبعينيات. عدد المستعمـرات المرتدة يتناسب طردي مع كمية التريس المضافة الى كل طبق. أدت مثل هذه النتائج الى سحب الملابس التي يدخل التريس في تصنيعها من الأسـواق (عن أ. بلوم و ب. ن. إيمـز - ساينس ١٩٥ : ١٧-١٩٧٧).

عن نشاط الجينات. ولا تكتمل مناقشة علم الوراثة إلا بالتعرض للخطوات التي ينتج طراز جيني معين بها طرازاً مظهرياً معيناً. هذا هو موضوع الباب التالي.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تكون المعلومات الوراثية في جميع الكائنات تقريبا محمولة على جزيئات الحامض DNA (قلـة من الفيـروسات تستعمل الحامض RNA بدلا منه). جزيئات الحامض DNA هي بلمرات خطية غير متفرعة من الدي أوكسى ريبونيوكليوتيدات. ويوجد من هذه الـدى أو كسى ريبـونيوكليوتيدات أربعة أنواع تختلف فيما بينها في نوع القاعدة النـتروجينية المتصلة بكـل منهـا. القـواعد الأربعة هي البيورينات أدنين و الجوانين والبيريميدينات سيتوزين و ثايمين. السلسلة الواحدة عديدة النيوكليوتيد في الحامض DNA قد تحتوي على عدة ملايين من النيوكليوتيدات.

يوجد الحامض DNA في أغلب الخلايا على هيئة حلزون مزدوج : سلسلتان عديدتا النيوكليوتيد ملتفتان حول بعضهما. في أكثر صور الحامض إنتشارا - وهو يسمى B-DNA- يكون في كل لفة كاملة عشر نيوكليوتيدات وطولها ٣٤ وحدة أنجستروم بينما يبلغ قطر الحلزون المزدوج ٢٠ وحدة أنجستروم والسلسلتان في الحلزون المزدوج تجريان

فـي اتجـاهيـن متضـادين متـوازين : الأتجـاه ٥َ ← ٣َ لأحـدى السلسلتـين يكون مضـادا للأتجـاه ٣َ ← ٥َ. للسلسلة المكملة لها.

تضاعف الحامض DNA يكون نصف محافظ أي أن كل حلزون مزدوج يتم تخليقه حديثا يحتوي على سلسلة كاملة من الجزيء الأبوي و سلسلة حديثة التخليق. تخليق سلسلة جديدة يتطلب نظاما معقدا من الأنزيمات يشتمل على نوعين على الأقل من إنزيمات بلمرة الحامض DNA. ويكون تخليق كل سلسلة جديدة بأستعمال سلسلة أبوية كقالب أي أن القواعد الأربعة تتراكم في السلسلة الجديدة بنظام مكمل لنظام وجودها في السلسلة الأبوية المطلوب نسخها (الأدنين مع الثايمين والسيتوزين مع الجوانين . . . إلخ). الجينات في الكائنات بدائية النواه مثل بكتيريا القولون يشملها جزيء واحد من الحلزون المـزدوج للحـامض DNA الـذي يأخـذ شكـل دائرة مغلقة. توجد جينات الكائنات حقيقية النواه على كروموسوم يحتوي على جزيء واحد من الحامض DNA يكون مرتبطا مع أنواع متباينة من البروتينات.

تحتوي جميع الخلايا على وسائل إنزيمية لأصلاح التلف الذي قد يحدث في الحامض DNA. ويتضمن الإصلاح الناجح إحلال نيوكليوتيدات صحيحة محل تلك التالفة أو غير الصحيحة حسب الأسس الراسخة لأزدواج القواعد. الفشل في اصلاح الحامض DNA يؤدي الى حدوث الطفرة. الأشعاع المؤين مثل الأشعـة السينيـة وكذلـك العديد من المواد الكيميائية ترفـع معـدل تلـف الحـامض DNA وبالتالي حدوث الطفرة.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ كم عدد تجمعات القواعد المختلفة يمكن أن يوجد في جزيء DNA به ١٥٠ قاعدة؟

٢ ــ في أي إتجـاه - مع عقـارب الساعة أو ضد عقارب الساعة - يكون جزيء الحامض DNA عندما تنظر خلاله من إحدى نهايتيه؟ وعندما تنظر خلاله من النهاية الأخرى؟

٣ ــ كـم عـدد قواعـد السيتـوزين الموجودة في جزيء DNA به ١٠٠٠ من أزواج القواعد إذا كان ٢٠٪ من قواعد الجزيء من الأدنين؟

٤ ـ تحتوي خلية الطحال في العجل على ٦,٨ بيكوجرام (١٠$^{-١٢}$ جم) من الحامض DNA فاذا كان هذا الحـامض موجـودا كجـزيء واحـد فما هو وزنـة الجزيئي بالدالتون؟ (هناك تقريبا ٦ × ١٠^{٢٣} جزيء في المول). إذا كان الوزن الجزيئي لكل زوج من القواعد هو ٧٠٠ دالتون فما هو طول هذا الجزيء؟ وما هو سمكه؟

REFERENCES المراجع

1. CRICK F.H.C. "Nucleic Acids", Scientific American. Offprint No. 54, Septmeber, 1957. The author shared a Nobel prize for his work in deducing the organization of nucleic acid molecules.
2. HOTCHKISS, R.D., and ESTHER WEISS,"Transformed Bacteria," Scientific American. Offprint No. 18 November, 1956. The alteration of bacterial heredity by treatment with DNA is described in detail.
3. TAYLOR, J.H. "The Duplication of Chromosomes," Scientific American Offprint No. 60, June, 1958. Attempts to relate the structure of DNA to the structure of chromosomes.
4. HANAWALT, P.C. and R.H. HAYNES, "The Repair of DNA," Scientific American. Offprint No. 1061. February, 1967. Describes how bacteria are able to exploit the complementarity of the two strands of DNA in the repair of damage to the molecule.
5. DEVORET; R., "Bacterial Tests for potential Carcinogens," Scientific American, Offprint No. 1433, August, 1979. Describes the Ames test as well as tests devised by the author.
6. HOWARD-FLANDERS, P., "Inducible Repair of DNA," Scientific American Offprint No. 1503, November, 1981.
7. UPTON, A. C., "The Biological Effects of Low-level Ionizing Radiation," Scientific American. Offprint No. 1509, February, 1982.

CHAPTER 13 الباب الثالث عشر

GENE EXPRESSION التعبير عن الجينات

الباب الثالث عشر

التعبير عن الجينات

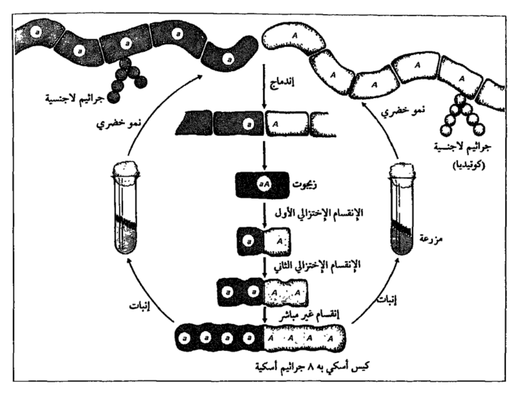
١٣-١ . نظرية جين واحد - إنزيم واحد

THE ONE GENE - ONE ENZYME THEORY

نمت معلوماتنا عن فعل الجينات من دراسات عالمي الوراثة ج. و. بيدل و أي. ل. تاتم على فطر عفن الخبز الأحمر *Neurospora* وهو ملائم بصفة خاصة للدراسات الوراثية ودورة حياته موضحة في الشكل ١٣-١ . مثل كل الفطريات فهو ينتج جراثيما أو أبواغا spores والجراثيم عبارة عن أجسام ضئيلة وحيدة الخلية تعمل على إنتشار النوع الى أماكن جديدة وتمكنه من التغلب على الظروف البيئية غير المواتية. وتستطيع كل جرثومة أن تنمو لتعطى فردا جديدا.

فطر نيوروسبورا ينتج نوعين من الجراثيم . الجراثيم اللاجنسية (أو الكونيديا conidia) تنتج بطريقة الأنقسام غير المباشر للأنوية النشيطة أحادية العدد الكروموسومي للفطر. أما الجراثيم الزقية أو الأسكية ascospores فانها تنتج من التكاثر الجنسي sexual reproduction فاذا سمح لنوعين تزاوجيين (جنسين) من النيوروسبورا بالنمو معا فانهما يندمجان لتكوين زيجوت ثنائي العدد الكروموسومي. ويعمل الأنقسام الأختزالي للزيجوت على إنتاج جراثيم زقية أحادية العدد الكروموسومي.

لاحظ إذن أن الكائن يقضى معظم دورة حياته في الحالة أحادية العدد الكروموسومي وعلى ذلك يكون كل جين موجود بصورة مفردة وليس على عالم الوراثة أن يقلق بسبب إحتجاب جينات متنحية بسبب وجود جينات سائدة. ميزة أخرى هي أن الأنقسام الأختزالي يحدث في أنبوبة ضيقة هي الكيس الزقي (أو الكيس الأسكي)

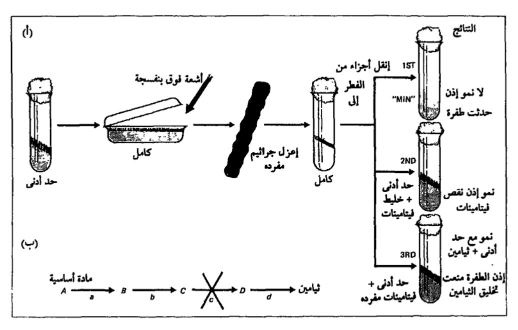


الشكل ١٣-١. دورة حياة فطر نيوروسبورا. التوزيع المبين هنا للجينات المتضادة A و a يحدث فقط اذا لم يحدث تبادل في هذا المكان أثناء عملية العبور في الإنقسام الإختزالي الأول.

ascus وهذه الأنبوبة ضيقة بدرجة تكفي لمنع الأنوية الثمانية الناتجة من الأنقسام الأختزالي الأول ثم الثاني ثم إنقسام غير مباشر من الأنزلاق على بعضها البعض. يترتب على ذلك أنه إذا كانت النواه ثنائية العدد الصبغي الأصلية متباينة اللاقحة بالنسبة لجينين متضادين (A, a) و أنه لم يحدث عبور في هذا الموقع فان الجينين ينفصلان عن بعضهما في الأنقسام الأختزالي الأول. وبعد الأنقسامين التاليين فان الكيس الزقي يكون به أربع جراثيم تحتوي على أحد الجينين عند أحد طرفية و أربع جراثيم تحتوي على الجين الأخر عند طرفه الثاني. (ماذا يكون النمط إذا حدث عبور في الأنقسام الأختزالي الأول؟).

يمكن زراعة النيوروسبورا في أنابيب اختبار تحتوي على وسط غذائي بسيط للغاية (أي به الحد الأدنى). كل ما هو مطلوب لحياة ونمو و تكاثر النيوروسبورا هو السكروز وقليل من الأملاح وفيتامين واحد هو البيوتين. ويستطيع النيوروسبورا من هذه المواد القليلة البسيطة أن يقوم بتخليق كل المواد العديدة المعقدة اللازمة للحياة مثل

البروتينات و الأحماض النووية . قام بيدل وتاتم بتعريض بعض الجراثيم اللاجنسية من نيوروسبورا للأشعة فوق البنفسجية على أمل إحداث الطفرات . ثم سمحا للجراثيم الفردية المشععة بالأنبات على وسط «كامل» أي به فيتامينات وأحماض أمينية عديدة . وبمجرد أن أعطت كل جرثومة نموا قويا سمح لها بالتزاوج مع النوع التزاوجي الاخر. تم إستخراج الجراثيم الزقية الناتجة كل على حدة ثم وضعت كل منها على كمية إضافية من الوسط الكامل. وبعد حدوث النمو أخذت من كل مزرعة ثم وضعت على وسط غذائي به الحد الأدنى (الشكل ١٣-٢). في بعض الأحيان إستمر النمو وفي البعض الاخر توقف. الحالات التي توقف فيها النمو تم إمداد السلالة المعينة بالعديد من الفيتامينات والأحماض الأمينية وغيرها حتى إستؤنف النمو. وفي النهاية وجد أن كل سلالة ناقصة يمكنها النمو على وسط به الحد الأدنى بعد إضافة مادة واحدة مكملة إليه مثل الفيتامين ثيامين thiamine. وقد فكر بيدل وتاتم في أن الأشعة فوق البنفسجية قد أحدثت طفرة في جين يسمح بتخليق الثيامين وحولته الى الجين المضاد الذي لا يسمح بذلك.



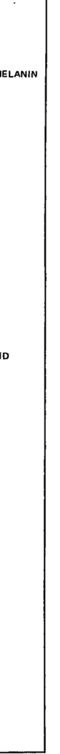
الشكل ١٣-٢ . (أ) تجارب بيدل و تاتم و (ب) الافتراض. التهجين بين سلالة متطفرة وسلالة عادية أوضح أن القدرة على تحويل المادة الأساسية للثيامين C الى D يتحكم فيها جين واحد. من المحتمل أن الجين المتطفر لم يتمكن من انتاج الانزيم اللازم. الوسط الكامل أضيفت اليه فيتامينات و أحماض أمينية أما وسط الحد الأدنى فلم تضف اليه هذه المواد.

تصنيع الثيامين من المواد البسيطة الموجودة في الوسط ذي الحد الأدنى لا يتم في تفاعل كيميائي واحد ولكن يمر بسلسلة طويلة من هذه التفاعلات. ومثل كل التفاعلات الكيميائية في الكـائنـات الحية فان كل تفاعل يحفزه إنزيم خاص وعند إضافة المواد الوسيطة في عملية تصنيع الثيامين واحدة بواحدة الى الوسط الذي ينمو عليه الفطر تمكن بيدل وتاتم من تحديد الخطوة التي تعطلت في عملية تخليق الثيامين في السلالة المتطفرة (الشكل ١٣-٢). فاذا أضافا أي مادة وسيطة تدخل في عملية التخليق بعد هذه الخطوة الى الوسط ذي الحد الأدنى كان النمو يحدث. وأي مادة وسيطة تدخل قبل هذا التفاعل المعطل لم تسمح بالنمو. وقد فكرا في أن التغير من المادة الوسيطة "C" الى المادة الوسيطة "D" قد توقف بسبب غياب الأنزيم الخاص. وعلى هذا الأساس فقد قالا بنظرية جين واحد - إنزيم واحد لتفسير فعل الجينات: كل جين في الكائن ينظم إنتاج إنزيم خاص. وهذه الأنزيمات هي التي تقوم بكل النشاطات الأيضية في الكائن مما يؤدي الى ظهور تركيب وفسيولوجيا مميزة له - أي الطراز المظهري للكائن.

١٣-٢ . أخطاء داخلية في الأيض INBORN ERRORS OF METABOLISM

القت إكتشافات بيدل وتاتم ضوءا جديدا على عدد من أمراض الأنسان المعروفة بأنها وراثية. سميت هذه الأمراض بالأخطاء الداخلية في الأيض لأنها وراثية ولأن كل منها يتميز بعيب معين في الأيض. أحد هذه الأمراض هو البول الأسود alcaptonuria وهـو نادر نسبيا والعرض الأساسي فيه هو تحول بول المريض الى اللون الأسود عند تعرضه للهواء. وقد أوضحت الدراسات أن المرض يحدث عندما يغيب الأنزيم الذي يحفز تحول حامض الهوموجنتيسيـك homogentisic الى حامض ماليل أسيتوخليك maleylacetoacetic acid (الشكل ١٣-٣) من جسم الانسان. هاتان المادتان هما من بين المواد الوسيطة في عملية تكسير الحامض الأميني فينيل ألانين phenylalanine الى مركبات يمكن أن تدخل في مسار التنفس الخلوي. وعندما تتوقف الخطوة رقم ٤ يتراكم حامض الهـوموجنسيتيك في الدم وعندما يتأكسد حامض الهوموجنستيك بفعل الهواء يتحول البول الى اللون الأسود.

خطـأ داخـلي آخـر في الأيض يسمى فينيـل كيتونيوريا phenylketonuria (RKU) وينشأ عن تعطل الخطوة رقم ١. في هذه الحالة يتسبب العجز عن إزالة الفينيل الانين



الشكل ١٣-٣. مسار أيض الفينيل ألانين في الانسان. الفينيل ألانين الزائد عن حاجة الجسم لتخليق البروتين يتم تكسيره كما هو موضح هنا ويستعمل في التنفس الخلوي. ضحايا الفينيل كيتونوريا ينقصهم انزيم (١) الذي يحول الفينيل ألانين الى الحامض الأميني تيروسين. ضحايا البول الأسود ينقصهم الانزيم (٤). ذرات الكربون ملونة وذرات النتروجين سوداء وذرات الهيدروجين ممثلة بخطوط قصيرة.

الزائد من الدم - أثناء الطفولة - في نقص خطير في مستوي الذكاء (معظم المصابين لابد من إيداعهم بالمصحات العقلية) والجلد الباهت والميل الى النوبات العصبية. وقد ينتج لون الجلد الباهت من نقص مادة التيروسين tyrosine التي تتكون منها مادة الميلانين melanin (المسئولة عن لون الجلد والنمش freckles). البول الأسود والفينيل كيتونيوريا هما صفتان متنحيتان. وعلى المرء أن يرث الجين المعيب من كل من أبويه حتى تظهر عليه الصفة وهذا يتمشى تماما مع نظرية جين واحد - إنزيم واحد: طالما أن جين واحد غير متطفر موجود فان الأنزيم اللازم سوف يتم تصنيعه.

الهيموجلوبينات الشاذة ABNORMAL HEMOGLOBINS

ربما كانت أكثر الأمراض الوراثية دراسة وتحليلا هي التي تنتج فيها جزيئات هيموجلوبين شاذة. الهيموجلوبين هو الصبغة الحمراء حاملة الأوكسجين الموجودة في خلايا الدم الحمراء. يتكون كل جزيء هيموجلوبين من أربع سلاسل عديدة الببتيد إثنتان منها ألفا وإثنان بيتا وبكل منها مجموعة هيم heme محتوية على الحديد الذي يتصل به مؤقتا جزيء الأوكسجين المطلوب نقله. سلسلة الفا تحتوي على ١٤١ حامض أميني وسلسلة بيتا تحتوي على ١٤٦ حامض أميني.

الهيموجلوبين العادي في الأنسان البالغ يعرف بأسم هيموجلوبين أ (Hb^A) ومع ذلك فقد أمكن إكتشاف ما يربو على ٢٠٠ نوع من الهيموجلوبينات الشاذة في البشر. أكثر هذه الهيموجلوبينات إنتشارا هو هيموجلوبين س (Hb^S). الأفراد الذين ينتجون الهيموجلوبين س يعانون من مرض يسمى فقر الدم المنجلي أو أنيميا الخلايا المنجلية sickle-cell anemia. هذا المرض منتشر في المناطق الموبوءة بالملاريا في أواسط أفريقيا وكذلك بين الزنوج الأمريكيين المنحدرين عن سكان هذه المناطق. ويكتسب هذا المرض إسمه من أن خلايا الدم الحمراء في ضحاياه تكون هلالية أو منجلية الشكل خاصة أثناء مرورها في الشعيرات الدموية (الشكل ١٣-٤). الخلايا المشوهة تكون هشة للغاية في هذا الوقت ويسهل تمزقها قبل إنقضاء مدتها العادية (حوالي ١٢٠ يوم). ويترتب على ذلك أن ضحايا هذا المرض يعانون من الأنيميا الحادة التي عادة ما تكون قاتلة.

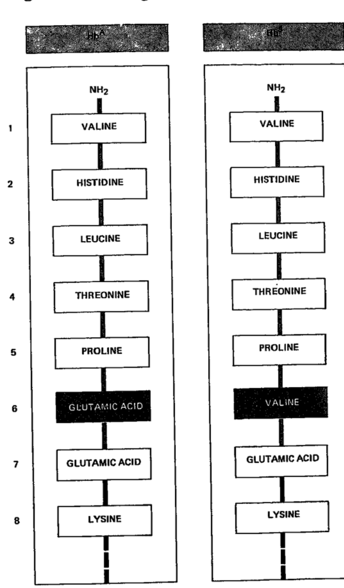
يرث ضحايا الأنيميا المنجلية جينا من كل واحد من الأبوين. أما الأفراد الذين



الشكل ١٣-٤. خلايا الدم الحمراء لأحد ضحايا الأنيميا المنجلية. أعلى: أعطيت أوكسجين. أسفل: حرمت من الأوكسجين. شكل الخلايا عندما تحرم من الأوكسجين يجعلها سهلة الكسر. (بتصريح من الدكتور أنتوني س. اليسون).

يرثـون جينـا معيبـا واحـدا فقـط فيكون لديهم Hb^A وHb^S في خلايا الدم الحمراء ولا يكـون ذلك ضارا بالكامل في الولايات المتحدة الخالية من الملاريا بينما تكون الحالة متباينة اللاقحـة (Hb^A و Hb^S) مفيدة بالتأكيد في المناطق التي تنتشر فيها الملاريا في أفريقيا إذ يبدو أنها تكسب صاحبها قدرا من المقاومة لأحد أنواع الملاريا. وقد يفسر ذلك لماذا يعم الجين المتطفر والمرض المناطق التي تنتشر فيها الملاريا في أفريقيا.

تـم تحديد تتابع الأحماض الأمينية في كل من Hb^A وHb^S وقد تبين أن سلاسل الفا متطابقة تماما في كل نوع من الهيموجلوبين وكذلك كانت السلاسل بيتا ما عدا الحامض



الشـكـل ١٣ـ٥. أجـزاء النهايات ن في الهيموجلوبين العـادي (Hb) وهيموجلوبين الخلايا المنجلية (Hb)

الأميني في الموقع رقم ٦ (يبدأ العدد دائما من النهاية الأمينية). هذا المكان يشغله حامض الجلوتاميك glutamic acid في السلال بيتا للهيموجلوبين العادي Hb^A أما في سلاسل بيتا بالهيموجلوبين س Hb^S فيوجد الفالين valine بدلا منه (الشكل ١٣-٥).

أما لماذا يغير هذا الاستبدال المفرد لحامض أميني كل هذا التغيير الضخم في خصائص الهيموجلوبين منزوع الأوكسجين فذلك ما يزال تحت دراسة عميقة. ومع ذلك تجدر الملاحظة هنا أنه بالأنتقال من حامض الجلوتاميك الى حامض الفالين يكون قد تم إحلال جزيء كاره للماء بشدة محل جزيء محب للماء بشدة. الموقع رقم ٦ يوجد عند سطح السلسلة بيتا حيث يكون عادة معرضا للماء وربما كان هذا التحول من منطقة محبة للماء الى منطقة كارهة للماء على السطح هو الذي يغير من القابلية العادية لجزيء الهيموجلوبين للذوبان.

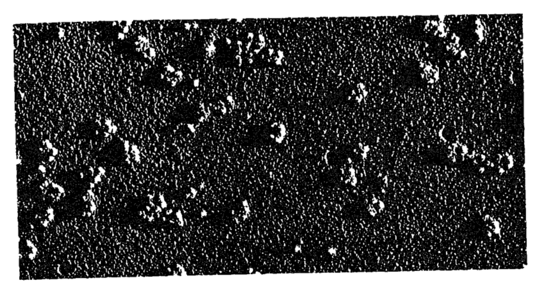
وفي جميع حالات الهيموجلوبينات الشاذة الأخرى التي إكتشفت تقريبا يكون الخلل في صورة إحلال حامض أميني واحد عند نقطة ماعلى السلسلة ألفا أو على السلسلة بيتا. كل سلاسل ألفا الشاذة تنتج عن طفرات في جين واحد أما السلاسل بيتا المتباينة فتمثل طفرات مختلفة في جين اخر. وعلى ذلك فانه يمكن الان إعادة صياغة نظرية جين واحد - إنزيم واحد بحيث تصبح «جين واحد - عديد الببتيد واحد». هذا التعديل يتوافق تماما مع الأعتقاد الحالي بأنه ليست الأنزيمات فقط ولكن جميع البروتينات المصنعة داخل الخلية (مثل : البروتينات التركيبية مثل الكولاجين) هي نواتج نشاط الجينات.

١٣-٣. تخليق البروتينات PROTEIN SYNTHESIS

استنتج بيدل وتاتم أن المعلومات المشفرة في الجين تجد التعبير عنها في تتابع الأحماض الأمينية في عديد الببتيد. ماهي إذن الآلية التي يؤدي بها تتابع معين للنيوكليوتيدات في الحامض DNA الى تتابع معين للاحماض الأمينية؟

الأحماض الريبونيوكلية في الخلية THE RIBONUCLEIC ACIDS OF THE CELL

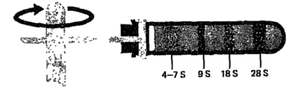
يتم تخليق البروتينات على تجمعات من دقائق سيتوبلازمية ضئيلة (حوالي ٢٠ نانومتر) تسمى الريبوسومات ribosomes (الشكل ١٣-٦). هذه الدقائق هي تجمعات



١٣-٦. صورة بالمجهر الأليكتروني توضح تجمعات الريبوسومات. هذه التجمعات - التي تسمى بوليسومات - تتماسك مع بعضها بواسطة الحامض mRNA (بتصريح من الكسندر ريتش).

الجزيئات. يتكون كل ريبوسوم من تحت وحدتين إحدهما كبيرة والأخرى صغيرة. أما الصغيرة فتحتوي على جزيء واحد من الحامض rRNA. في الكائنات حقيقية النواه يسمى هذا الجزيء RNA "18S" بسبب معدل ترسيبه في أنبوبة جهاز الطرد المركزي (الشكل ١٣-٧) وبالاضافة الى ذلك يرتبط حوالي ٣٠ بروتين بالتحت وحدة الصغيرة.

تحتوي التحت وحدة الكبيرة في ريبوسومات الكائنات حقيقية النواه على نسخة واحدة من كل من الجزيئات الثلاثة المختلفة من rRNA (والتي يرمز لها بالرموز 28S, 5.8S, 5S, الشكل ١٣-٧). ويرتبط مع هذه جزيئات لحوالي ٤٥ بروتين.



الشكل ١٣-٧. نمط الترسيب الناتج من الطرد المركزي عالي السرعة للحامض RNA. المستخلص من كرات الدم الحمراء للأرنب. الشرائط المحددة تمثل رتب معينة من الحامض RNA. الحامض الناقل tRNA تظهر عند حوالي 4S. أحماض RNA الريبوسومية لحقيقيات النواه تترسب عند 28S, 18S, 5 .8-S, 5S (كلما زادت وحدة الترسيب S كلما كان الجزيء أكبر - ولكن ليس بنفس النسبة). الحامض RNA الذي يكون الطبقة 9S هو الحامض mRNA الخاص بتخليق الهيموجلوبين وهو البروتين الرئيسي الذي تنتجه هذه الخلايا. في معظم الخلايا الأحماض mRNA تكون غير متجانسة مع كميات صغيرة منها موزعة بين 6S و حتى 25S.



الشكل ١٣-٨. صورة بالمجهر الأليكتروني توضح نسخ الجينات في بيضة سمندل الماء المرقط. الخيوط الطويلة هي جزيئات الحامض DNA المغلفة بالبروتين. الألياف الممتدة في تجمعات من المحاور الرئيسية هي جزيئات الحامض RNA التي تتكون منها ريبوسومات الخلية. لاحظ كيف يبدأ النسخ عند احدى نهايات كل جين مع تزايد طول جزيئات RNA كلما قاربت الاكتمال. لاحظ كذلك العدد الكبير (حتى ١٠٠) من جزيئات RNA المنسوخة في نفس الوقت من كل جين. أجزاء الحامض DNA العارية من الحامض RNA يبدو انها غير نشيطة وراثيا. (بتصريح من أو. ل. ميللر الصغير وباربارة ب. بيتي. قسم علم الأحياء ـ المعمل القومي أوك ريدج).

في الكائنات حقيقية النواه يتم تخليق جزيئات حامض الريبونيوكلييك الريبوسومي في النوية nucleolus بأستخدام قوالب الحامض DNA (أي الجينات) وهناك عدة نسخ من الجينات لكل نوع من الحامض rRNA (الشكل ١٣-٨). وفي الأنسان يحتمل أن تكون الجينات الخاصة بأخف الأحماض rRNA (وهو 5S) موجودة على الكروموسوم رقم ١ (الشكل ١١-٢٢).

إذا قمنا بأستخلاص الحامض RNA من خلية فان معظمة يقع في واحدة من عدة مجموعات حجمية محددة (الشكل ١٣-٧) . وكما رأينا فان الحامض RNA يوجد (في حقيقيات النواة) على هيئة جزيئات 28S, 18S, 5.8S, 5S. تتكون مجموعة محددة أخرى مما يسمى أحماض ريبونيوكليك الناقلة transfer RNA (tRNA). تترسب هذه الجزيئات عند مستوي حوالى 4S (وهذا يقابل أوزان جزيئية تتراوح مابين ٢٣٠٠٠ و ٣٠٠٠٠).

بالأضافة الى هذه المراتب المحددة من الحامض RNA هناك كمية قليلة منه تكون شديدة التباين في الحجم فهي تترسب عند مستوي يتراوح بين 25S, 6S ولها أوزان جزيئية تتراوح مابين ٢٥٠٠٠ الى مليون . وأغلب الخلايا تحتوي علي كميات قليلة من هذه المادة . ومع ذلك فان الخلايا التي تنشط في تخليق كميات كبيرة من بروتين واحد قد تحتوي على كميات كبيرة من حامض RNA خاص يختلف في حجمه عن أي واحد من الأحماض rRNA أو tRNA. فمثلا خلايا الدم الحمراء في الأرنب التي تقوم بتخليق الهيموجلوبين تحتوي على كميات ضخمة من الحامض RNA (الشكل ١٣-٧) . إذا عزلنا هذا الحامض ثم قمنا بحقنه في بيضة ضفدعة فان الضفدعة تبدأ في تخليق هيموجلوبين الأرنب . هذه الطبقة فقط من هيموجلوبين الأرنب هي الوحيدة القادرة على إعطاء التعليمات لبيضة الضفدعة لكي تقوم بتخليق هيموجلوبين الأرنب . وبسبب هذا الدور فقد سمى هذا الحامض RNA باسم المراسل messenger RNA (mRNA).

النسخ TRANSCRIPTION

يقود الحامض DNA عملية تخليق الحامض المراسل mRNA (وكذلك الحامض الناقل tRNA والحامض الريبوسومي rRNA ـــ أنظر الشكل ١٣-٨) بطريقة تشبه الى حد كبير قيادته لمضاعفة نفسه (أنظر القسم ١٢-٣). هناك إنزيم يسمى RNA polymerase يرتبط بمواقع معينة على الحامض DNA ويفصل سلستي الحلزون المزدوج ثم يأخذ في قراءة احدي السلسلتين (في الأتجاه ٣َ ← ٥َ) وفي أثناء ذلك يقوم بتجميع ريبونيوكليوتيدات ribonucleotides (وهذه تكون موجودة في الوسط المحيط في صورة ثلاثي الفوسفات مثل ATP) على هيئة خيط من الحامض RNA

الذي يكون تتابع القواعد فيه مكملا تماما لتتابع القواعد في جزيء الحامض DNA - أي أنها تتجمع حسب الأسس المعروفة لازدواج القواعد. لكل سيتوزين على سلسلة DNA التي يجري نسخها تنحشــر قاعـدة جوانين فـي سلسلـة mRNA ولكل جوانين في سلسلة DNA تنحشر قاعدة سيتوزين في سلسلة mRNA. الخ. تقود رواسب الأدنين الموجودة على سلسلة الحامض DNA عملية غرس نيوكليوتيدة محتوية على قاعدة يوراسيل uracil (u) (لا يـوجـد ثايمين في الحـامض RNA) عملية إعداد نسخة من الحامض DNA في صورة سلسلة مكملة من الحامض RNA تسمى عملية النسخ transcription.

تتقـدم عمليـة تخليق جزيئات الحامض RNA في الاتجاه ٥َ ← ٣َ. ويعمل ربط النيوكليوتيدات على اطـلاق كميات كبـيرة من الطاقة الحرة لأن مجموعتي الفوسفات الـطرفيتين في كل نيوكليوسيد ثلاثي الفوسفات تنفصلان مع اضافة النيوكليوتيد الى الخيط المتزايد. وقد تتذكر أن روابط الفوسفات الطرفية وما قبل الطرفية في النيوكليوسيد ثلاثي الفوسفات (مثل ATP) تسمى روابط عالية الطاقة High energy.

هنـاك أدلة عديدة على تخليق الحامض mRNA علـى قالـب من الحـامض DNA. ولنذكر مثال واحد منها. فعند امداد خيط تخليقي من الحامض DNA لا يحتوي الا على نيـوكليـوتيـدات بهـا ثايميـن فقـط (أي عديـد الثايمين Poly T) بكل الأنواع الأربعة مـن النيـوكليـوتيـدات (GTP, ATP, UTP, CTP) وانـزيم بلمرة الحامض RNA يتكون جزيء من الحامض RNA يحتوي على الأدنين فقط في الخيط (عديد الأدنين poly A).

الترجمــة TRANSLATION

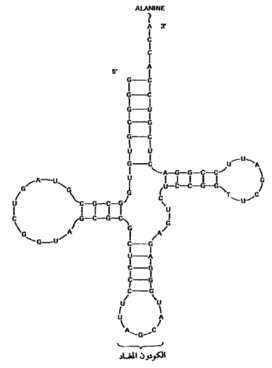
يستغل نسـخ وتضاعف الحـامض DNA التكامل بين النيوكليوتيدات. ولكن ليست هناك علاقة مباشرة شبيهة بذلك بين تركيب النيوكليوتيدات وتركيب الأحماض الأمينية كيف يحدد إذن تتابع معين من النيوكليوتيدات حامض أميني معين؟ هذا يتطلب نوع ثالث من الحامض RNA يسمـى الحامض RNA المراسل messenger RNA (mRNA).

هناك على الأقل نوع واحد من جزيئات الحامض tRNA لكل واحد من الأحماض الأمينية العشرين المستخدمة في تخليق البروتينات (بعض الأحماض الأمينية تحتاج الى نوعين أو ثلاثة أنواع من جزيئات الحـامض tRNA). كل نوع من الحامض tRNA يتعرف

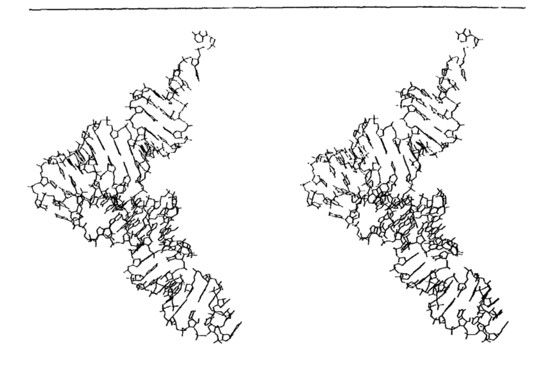
على ويتحد مع نوع واحد من الأحماض الأمينية . وفي كل حالة يتم تنشيط الحامض الأميني وإتصاله بجزيء الحامض tRNA المناسب بواسطة إنزيم منشط خاص بهذا الحامض الأميني ويقوم ATP بأمداد طاقة التنشيط .

كذلك يقوم كل نوع من الحامض tRNA بالتعرف على والأتحاد مع تتابع خاص من النيوكليوتيدات الموجودة على جزيء الحامض mRNA وهو مايسمى الكودون codon هذا الاتحاد النوعي بين كل نوع من الحامض tRNA مع حامض أميني معين ومع كودونات معينة يجعل المعلومات المشفرة في تتابع الريبونيوكليوتيدات يترجم الى تتابع محدد للأحماض الأمينية .

تم تحديد تركيب العديد من جزيئات الحامض tRNA. يتكون كل منها من سلسلة بها ٧٣-٩٣ من الريبونيوكليوتيدات (الشكل ١٣-٩) و العديد منها هو نيوكليوتيدات الحامض RNA العادية (أي التي تحتوي على الأدنين - اليوراسيل - الجوانين والسيتوزين) وتقوم القواعد في أماكنها بربط قطعتين من السلسلة على هيئة



الشكل ١٣-٩. تركيب الحامض RNA الناقل للألانين في الخميرة. الأجزاء الأربعة الحلزونية المكونية بازدواج القواعد مبينة . العروة على اليسار يظن انها تتعرف على (وترتبط مع) الانزيم الذي يحفز الاتصال (بواسطة رابطة عالية الطاقة) بين الألانين والجزيء (أعلى) . عروة الكودون المضاد تحمل القواعد الثلاث التي تتعرف على الكودون المناسب على الحامض mRNA. العروة الموجودة في الجزء الأيمن قد تكون مسئولة عن الارتباط المؤقت بين جزيء الحامض RNA و الريبوسوم. استخدام حروف ملونة لقواعد معينة يوضح ان القاعدة الفعلية هي صورة متحورة كيميائيا من القاعدة المبينة هنا .



الشكل ١٣-١٠. منظر مجسم للحامض RNA الناقل للفينيل ألانين من الخميرة. النهاية ٣ حيث يتصل الفينيل ألانين في الجانب الأيمن العلوي. الكودون المضاد في الجزء الأيمن السفلي. التعليمات الخاصة بالتحام الصورتين موجودة تحت الشكل ٤-٢٤. (بتصريح من الدكتور سونج - هو كيم).

حلزون مثلما في حالة جزيء الحامض DNA (الشكل ١٣-١٠). ولهذا السبب تنشأ عدة إنثناءات في السلسلة. في جميع جزيئات الحامض tRNA يوجد التتابع سيتوزين - سيتوزين - أدنين عند النهاية ٣. الحامض الأميني النشيط يلتصق بالأدنين (الشكل ١٣-٩).

القواعد غير المزدوجة مع بعضها عند «إنثناءة الكودون المضاد anticodon loop» تتعرف على القواعد المكملة الموجودة على mRNA و تتحد معها حسب أسس إزدواج القواعد. تماما كما يتضمن تضاعف ونسخ الحامض DNA إزدواج قواعد النيوكليوتيدات التي تجري في إتجاهين متضادين فان قراءة الكودونات في الحامض mRNA (٥َ ← ٣َ) تتطلب إرتباط الكودون المضاد في الاتجاه المضاد:

الكودون المضاد	٣َ	أدنين	أدنين	جوانين	٥َ
الكودون	٥َ	يوراسيل	يوراسيل	سيتوزين	٣َ

هناك عشرون نوعاً أو أكثر من الحامض tRNA يحمل كل منها حامض أميني واحد معين يمكنها أن تتحد مع تلك الأجزاء من الحامض mRNA حيث تكون القواعد

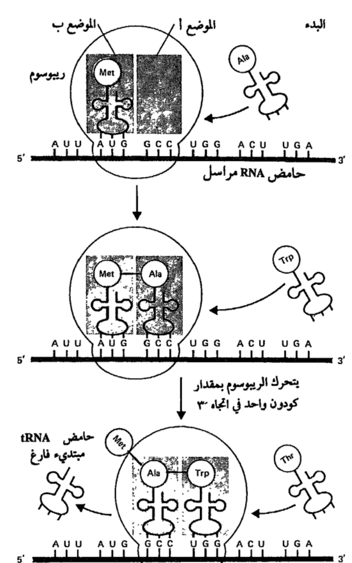
مكملة للقواعد المكشوفة على إنثناء الكودون المضاد في الحامض tRNA وبهذه الطريقة يتم تجميع الأحماض الأمينية في تتابع معين لتكوين عديد الببتيد. هذا التتابع للأحماض الأمينية يحدده تتابع القواعد في الحامض mRNA وبالتالي في الحامض DNA الموجودة في الجين (الشكل ١٣-١١). تتم ترجمة الحامض mRNA على الريبوسومات وهذه العملية تتم على ثلاث مراحل:

١ ـ **البـــدء** Initiation : يلتصق الريبـوسـوم على موقـع معين للبدء على جزيء الحامض mRNA. يوجد هذا الموقع على بعد بضع نيوكليوتيدات لأعلى (أي على الجانب ٥َ) من بداية الرسالة. ثم يلتحم حامض tRNA خاص يسمى البادىء initiator على الكودون (عادة عند AUG) الذي يبدأ كل رسالة ويكون الألتحام عنـد موقع علـى الريبـوسوم يسمى الموقـع P. الحامض الأميني الذي يحمله الحـامض البـاديء هـو الميثيونين methionine (أو صورة معدلة منه تسمى f Met في البكتيريا).

٢ ـ **الأستطالـة** Elongation : يصـل جزيء tRNA القادر على ازدواج القواعد مع كودون الحـامض mRNA عند موقع مجاور على الريبوسوم (يرمزله بالحرف A). الحامض الأميني السابق (الميثيونين عند بداية الترجمة) يرتبط مع الحامض الأميني الـلاحق برابطة ببتيدية ويتحرر الحـامض tRNA البادىء من الموقع P ليتحرك الريبوسوم بمقدار كودون واحد في الأتجاه التنازلي. هذا ينقل أحدث الأحماض tRNA في الوصول - بما عليه من ثنائي الببتيـد - الى المـوقـع P ويفتح الموقع A لوصول حامض tRNA أخر حاملا معه حامض أميني ثالث الى سلسلة عديدة الببتيد المتنامية. وبهذه الطريقة تتم ترجمة الرسالة (التي سبق نسخها الى جزيء mRNA) الى تتابع محدد للأحماض الأمينية في عديد الببتيد (الشكل ١٣-١١).

٣ ـ **النهـايـة** Termination: تستمر إستطالة عديد الببتيد كما وصفناها حتى نهاية الـرسـالـة. وتتحـدد النهاية بالكودون (UUA و UAG و UGA) التي لا توجد لها جزيئات من الحامض tRNA. ومع ذلك فهذه الكودونات النهائية تتحد مع بروتين يحرر عديد الببتيد من الريبوسوم. وعندما يحدث ذلك ينشق الريبوسوم الى تحت وحدتيه اللتين يمكن تجمعهما فيما بعد لجولة أخرى من جولات تخليق البروتين.

في الكائنات حقيقية النواه تتم عملية نسخ الحامض DNA الـى الحامض RNA في



الشكـل ١٣-١١. آليـة تخليق عديد الببتيد حسب المعلومات الوراثية التي تم نسخها من الحامض DNA في صورة حلزون من الحامض mRNA. تفاعل الكودونات (موضحة) الموجودة على الحامض mRNA مع الكودونات المضادة (غير موضحة) الموجودة على الحامض tRNA يحدث عند الجزء الصغير من الريبوسوم. تكوين الروابط الببتيدية يحدث عند الجزء الكبير من الريبوسوم. الريبوسوم يقرأ الرسالة من النهاية 5' وحتى النهاية 3' أنظر النص لمزيد من التفاصيل.

النواه. أما ترجمة الحامض mRNA فتحدث على الريبوسومات الموجودة في السيتوبلازم. جزيئات الحامض RNA التي يتم تخليقها في النواه تكون أكبر بكثير من الرسائل التي سوف تتم ترجمتها في السيتوبلارزم والسبب الرئيسي في ذلك أن قطع الحامض RNA التي لن تترجم تكون موجودة مبدئيا في كل أنحاء الجزيء (وتسمى المنسوخ الابتدائي primary transcript) ويتم إستبعاد معظم هذه القطع قبل أن يغادر الجزيء النواه. بالأضافة الى ذلك يرتبط خيط طويل (١٠٠-٢٠٠) من الرواسب الأدينينية (poly. A) الى النهاية ٣َ من جزيء الحامض mRNA. يحتفظ الجزيء بهذا الذيل من عديد الأدنين عند دخوله الى السيتوبلازم وكلما زاد طول هذا الذيل كلما

كان الجزيء أكثر إستقرارا. وربما حدد طول الذيل من عديد الأدنين بطريقة ما عدد مرات ترجمة ذلك الجزيء من الحامض mRNA.

على الرغم من أن ريبوسوم واحد يستطيع تصنيع عديد الببتيد من جزيء الحامض mRNA إلا أنه عادة ما تشترك عدة ريبوسومات في هذه العملية في آن واحد. الجزيء الواحد من الحامض mRNA الذي تتصل به عدة ريبوسومات في المراحل المختلفة من تخليق عديد الببتيد يسمى البوليسوم (الجسم المتعدد) polysome (الشكل ١٣-١٢).

هنا إذن ألية يتحكم بها تتابع فريد للقواعد في الحامض DNA في تكوين تتابع فريد من الأحماض الأمينية في البروتينات التي يتم تصنيعها في الخلية وبذلك يكون الحامض DNA في الخلية بمثابة النسخة الأصلية master copy للمعلومات الوراثية بينما يكون الحامض mRNA بمثابة النسخة العاملة working copy. وهنا قد يفيد التشبيه في توضيح ذلك. ففي صناعة التسجيلات يذهب قدر كبير من العناية والتكاليف نحو إنتاج نسخة رئيسية من التسجيل. وهذه أغلى وأقيم من أن تستعمل في إنتاج الاف النسخ البلاستيكية التي سوف تباع للجمهور وبدلا من ذلك يتم إنتاج نسخ عاملة من النسخة الرئيسية وهذه النسخ التي تسمى بالأمهات mothers هي التي تستعمل بعد ذلك في الحصول على المنتج النهائي.

١٣-٤. الشفـــرة THE CODE

هناك أيضا قدر هائل من الدراسات التي تمت في محاولة لتحديد التتابع في قواعد جزيء الحامض mRNA الذي يعمل كشفرة لكل من الأحماض الأمينية. هناك فقط أربعة أنواع من القواعد (G,C,U,A) في جزيء الحامض mRNA وهي أقل من أن يكون كل منها شفرة لحامض أميني واحد. يمكن عمل ١٦ تجمع مختلف لأزواج هذه القواعد (UA, UU, AA.. إلخ) ولكن ذلك مايزال أقل من العدد المطلوب. أما ثلاثيات هذه القواعد triplets of bases فيمكن ترتيبها بأربع وستين طريقة مختلفة (الشكل ١٣-١٣) وبذلك يكون فيها إحتمالات زائدة عما هو مطلوب كشفرة للعشرين حامض أميني. وفي الواقع يمكننا أن نتوقع قيام إثنتين أو ثلاث من هذه الثلاثيات المختلفة بدور الشفرة



الشكل ١٣-١٢. النسخ والترجمة المتزامنين في بكتيريا القولون . الليفة الطويلة (٣ ميكرون) الجارية من القمة الى القاع هي قطعة من كروموسوم البكتيريا. تمتد منها البوليسومات التي يزيد طولها بصفة عامة من القمة الى القاعدة. كل بوليسوم يتكون من عمود فقرى من الحامض mRNA تتصل به الريبوسومات. كل بوليسوم يتصل بالحامض DNA بتركيب يظن أنه جزيء من انزيم RNA بوليميريز. وعلى ذلك يبدو أن نسخ الحامض DNA يتم بواسطة جزيئات RNA بوليميريز التي تتحرك من القمة الى القاع بينما تتم ترجمة الحلزونات المتزايدة في الطول من الحامض mRNA بواسطة الريبوسومات المتحركة عليهم في اتجاه الطرف القريب الى الطرف البعيد. في بكتيريا القولون وربما في كل بدائيات النواه يكون نسخ الحامض DNA الى mRNA و ترجمة الحامض mRNA الى سلاسل عديدة الببتيد في تناسق كبير. (صورة المجهر الاليكتروني مكبرة ٧٥٠٠٠ مرة - بتصريح من أو. ل. ميللر الصغير).

لحامض أميني واحد. هذه الشفرة من الثلاثيات يمكن أيضا أن تفسر وجود أكثر من ٢٠ حامض tRNA مختلفين في خلية مع قيام كل من حامضين أو ثلاثة منها في بعض الحالات بأحضار نفس الحامض الأميني الى عديد الببتيد المتنامي.

النيوكليوتيده الأولى	النيوكليوتيده الثانية SECOND NUCLEOTIDE				النيوكليوتيده الثالثة
	U	C	A	G	
U	UUU, UUC Phenylalanine (Phe) UUA, UUG Leucine (Leu)	UCU, UCC, UCA, UCG Serine (Ser)	UAU, UAC Tyrosine (Tyr) UAA stop UAG stop	UGU, UGC Cysteine (Cys) UGA stop UGG Tryptophan (Trp)	U C A G
C	CUU, CUC, CUA, CUG Leucine (Leu)	CCU, CCC, CCA, CCG Proline (Pro)	CAU, CAC Histidine (His) CAA, CAG Glutamine (Gln)	CGU, CGC, CGA, CGG Arginine (Arg)	U C A G
A	AUU, AUC, AUA Isoleucine (Ile) AUG Methionine (Met) or start	ACU, ACC, ACA, ACG Threonine (Thr)	AAU, AAC Asparagine (Asn) AAA, AAG Lysine (Lys)	AGU, AGC Serine (Ser) AGA, AGG Arginine (Arg)	U C A G
G	GUU, GUC, GUA, GUG Valine (Val)	GCU, GCC, GCA, GCG Alanine (Ala)	GAU, GAC Aspartic acid (Asp) GAA, GAG Glutamic acid (Glu)	GGU, GGC, GGA, GGG Glycine (Gly)	U C A G

الشكل ١٣-١٣ . الشفرة الوراثية . لاحظ أن الكودونات المبينة هنا هي كودونات الحامض RNA وليس الحامض DNA. أي أن هذه هي الكودونات الموجودة في الحامض mRNA.

عن طريق تخليق جزيئات mRNA ثم إمدادها بالريبوسومات و ATP والأنزيمات المنشطة وكل الأحماض الأمينية العشرين أمكن تحديد ثلاثيات الشفرة الخاصة بالأحماض الأمينية المختلفة. فمثلا الحامض mRNA التخليقي الذي يحتوي على قواعد يوراسيل فقط (أي poly - U) ينتج عديد ببتيد يحتوي على الحامض الأميني فينيل ألانين فقط. وذلك يوحي بان الثلاثية UUU ترشد عملية إدماج الحامض فينيل ألانين في سلسلة عديد الببتيد التي لا تحتوي إلا على الحامض الأميني ليسين. ومن خلال إستعمال جزيئات الحامض mRNA التخليقية الأخرى أمكن الربط بين واحدة أو أكثر من الثلاثيات مع كل واحد من الأحماض الأمينية العشرين (الشكل ١٣-١٣). وبسبب هذه العلاقة الشفرية سميت كل ثلاثية من القواعد بالكودون (أي وحدة الشفرة) codon

تعمل ثلاثة من الكودونات الأربعة و الستين المحتملة (UGA, UAG, UAA) كنهايات تتوقف عندها عملية الترجمة. ويخدم الكودون AUG غرضين مرتبطين فعندما يوجد AUG في داخل الرسالة فانه يعمل على إضافة الحامض ميثيونين (Met) ومع ذلك تبدأ جميع الرسائل ب AUG. وعلى الرغم من أنها أيضا تحمل الميثيونين (f Met في البكتيريا)

فان الحامض tRNA البادىء والذي يلتحم مع AUG عند بداية الرسالة ليس هو نفس الحامض tRNA الذي يحضر الميثيونين الى كودون AUG في داخل الرسالة ويتم تجنب اللبس بين الأثنين عن طريق عدم قدرة الحامض tRNA البادىء على الألتحام مع الموقع A على الريبوسوم.

تستطيع بعض جزيئات الحامض tRNA التعرف على أكثر من كودون واحد. فمثلا الحامض tRNA الخاص بالفينيل ألانين والذي يحمل الكودون المضاد GAA لايتعرف فقط على الكودون UCC (كما قد تتوقع) ولكن أيضا على الكودون UUU. العديد من جزيئات الحامض tRNA الأخرى تستطيع الألتحام مع إثنين أو حتى ثلاثة من الكودونات التي تختلف فقط في الموقع الثالث بكل منها. لاحظ في الشكل ١٣-١٣ كيف يمكن تشفير غالبية الأحماض الأمينية بواسطة كودونات مترادفة لا تختلف في الموضع الثالث. سمى الخروج على الأسس المألوفة لأزدواج القواعد في موضع القاعدة الثالثة في الكودون بالتذبذب "wobble".

الطفـــرات MUTATIONS

الكودونان GAG, GAA هما الشفرة الخاصة بحامض الجلوتاميك (الشكل ١٣-١٣). في المثال الخاص بنوعي الهيموجلوبين Hb^A , Hb^S فان إحلال قاعدة واحدة هي اليوراسيل U محل الأدنين A في وسط الكودون يحول هذين الكودونين الى GUG, GUA. وكلاهما في الواقع مخصص للفالين valine وهو الحامض الأميني الذي يحل محل حامض الجلوتاميك في هيموجلوبين الخلايا المنجلية. وعلى ذلك يكون الفرق الأساسي بين ضحية أنيميا الخلايا المنجلية وشخص لديه هيموجلوبين عادي هو وجود الأدنين (A) بدلا من الثايمين (T) في الجزء من الحامض DNA الذي ينسخ الى الحامض mRNA الخاص بالسلسة بيتا من الهيموجلوبين. وقد تجد أن هذا التغير ضئيل ولكن إحلال الفالين محل حامض الجلوتاميك يغير من الخواص الفيزيائية للهيموجلوبين لدرجة أن أ نيميا قاتلة تظهر على الأفراد الذين يحملون كلا الجينين لهذه الصفة.

هناك مع ذلك طفرات صامتة silent بسبب وجود التذبذب. فاذا كان التغير في أزواج القواعد في الحامض DNA يؤدي إلى تكوين كودونات مترادفة في الحامض mRNA فان عديد الببتيد الناتج من الترجمة لن يتغير.

١٣-٥ . الجينات المتضادة المتعددة MULTIPLE ALLELES

لا تؤدي كل التغيرات في القواعد الى تغير في عديد الببتيد و تستطيع أن تقدر أنه حتى في جين صغير مثل ذلك الذي يحدد سلسلة بيتا في الهيموجلوبين فان العدد المحتمل للطفرات يكون ضخما جدا. في الواقع عندما تقدمت دراسة الجينات وتأثير الجينات فقد تبين أن أي جين يمكن أن يتطفر بعدة طرق. على مدى سنوات قليلة تم إكتشاف أكثر من ٢٠٠ طفرة مختلفة في الجينين المتحكمين في تخليق السلسلة الفا والسلسلة بيتا في هيموجلوبين الأنسان معظمها يؤدي الى عديد ببتيد به إحلال في حامض أميني واحد في مكان ما من طوله.

الجين المتطفر للهيموجلوبين Hb^S هو جين مضاد للجين الخاص ب Hb^A. جميع الطفرات الأخرى في السلسلة بيتا للهيموجلوبين هي أيضا متضادة و نحن نستعمل المصطلح جينات متضادة متعددة multiple alleles كلما كان هناك عدة صور متطفرة من جين واحد. لاحظ أن أي فرد يمكن أن يحمل إثنين فقط من الجينات المتضادة (مثل Hb^A, Hb^S كل منهما على كروموسوم. قد يوجد عدة جينات متضادة في عشيرة. في ذباب الفاكهة وجد أكثر من ١٢ من الجينات المتضادة في موضع واحد يتحكم في لون العينين.

إذا كان جين سائد ينتج عديد ببتيد فهل يكون نظيره المتنحى غير منتج لأي عديد ببتيد؟ بالتأكيد لا يحدث ذلك مع الجينات المحددة للهيموجلوبينات الشاذة. الشخص متباين اللاقحة للأنيميا المنجلية ينتج كلا من Hb^S , Hb^A في نفس خلايا الدم الحمراء. مثل هؤلاء الأشخاص يمكن تمييزهم عن متماثلي اللاحقة في Hb^S أو Hb^A. هناك حالات عديدة أخرى حيث ينتج كل جين تأثيرة الخاص على الطرز الظاهري للهجين. هذا الموقف يسمى (كما قد تتذكر من الباب ١٠) السيادة الناقصة codominance.

١٣-٦ . تأكيد الشفرة VERIFICATION OF THE CODE

البحث البارع الذي أدي الى تحديد مهام الكودونات الموضح في الشكل ١٣-١٣ تم في أنابيب اختبار. ربما لهذا السبب وربما لأن القصة التي تمخض عنها هذا البحث

بدت خرافية فقد تساءل عدد من علماء الأحياء إن كان هذا النظام فعالا في الكائنات الحية. كان المطلوب هو تحديد التتابع الدقيق للنيوكليوتيدات في جين (أو جزيء من الحامض mRNA) و إثبات ما إذا كان تتابع القواعد متفق مع تتابع الأحماض الأمينية في البروتين المعبر عن شفرة هذا الجين (أو الذي تم تخليقه بهذا الجزيء من mRNA). لسوء الحظ فأن الخلية الواحدة تحتوي (كمعظم الخلايا) على نسختين من كل جين (مع بعض الأستثناءات). وبينما قد ينسخ جين واحد الى عدة نسخ من mRNA فأن معظم الخلايا تحتوي في أي وقت من الأوقات على عدة أنواع من mRNA لايوجد أي منها بكميات كبيرة. ومن أجل تحديد التتابع فأن الكيميائي يحتاج الى كميات كبيرة من مواد نقية.

جاء المخرج من هذا المأزق من وجود بعض فيروسات بكتيرية bacteriophages تستعمل الحامض RNA بدلا من الحامض DNA كمادة وراثية. لهذه الفيروسات دورة عدوى تشبه أساسا تلك المبينة في الشكل ١٢-٤. كل وحدة فيروسية تتكون من غشاء بروتيني بداخله جزيء واحد من حلزون مفرد من RNA بدلا من DNA الموجود في العديد من الفيروسات (كما هو موضح في الشكل ١٢-٤). هذا الجزيء من RNA له وظيفة مزدوجة فهويحمل كل جينات الفيروس وعددها ثلاثة. أحد هذه الجينات يحمل شفرة وحدة بناء إنزيم بلمرة RNA (RNA polymerase) وهو الذي يستعمل جزيء RNA الكامل لتخليق نسخ إضافية. نسخ RNA ← RNA للمادة الوراثية يشبه النسخ الجيني DNA ← DNA الذي درسناه في الباب السابق.

الجين الثاني يحمل شفرة جزيء البروتين الذي يتركب منه غشاء الفيروس. الجين الثالث يحمل شفرة البروتين "A" اللازم لنجاح تجميع الفيروس.

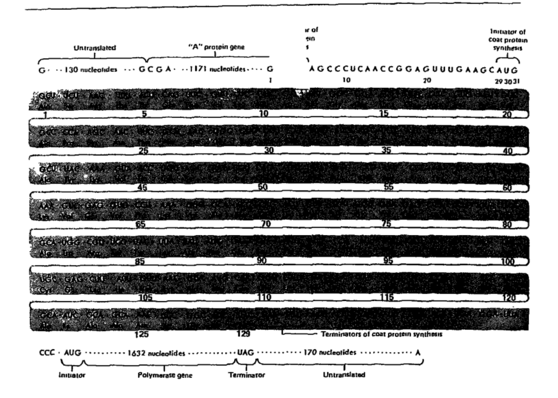
في إمداده بالمعلومات التي يمكن ترجمتها الى هذه النواتج الجينية الثلاثة فان جزيء RNA في هذا الفيروس البكتيري يؤدي أيضا وظيفة حامض mRNA. وكما هي الحال مع فيروسات DNA فان آلية الترجمة (ريبوسومات و tRNA و أحماض أمينية والعديد من العوامل البروتينية الخاصة) هي تلك الخاصة بالخلية العائلة للفيروس وهي في هذه الحالة بكتيريا القولون *E.coli* .

التركيب الأبتدائي (أي تتابع الأحماض الأمينية) في الغشاء البروتيني للعديد من

فيروسات RNA البكتيرية هذه تم تحديده. تركيب بروتين الغشاء للفيروس المسمى MS2 موضح في الشكل ١٣-١٤ وهو عديد الببتيد المكون من ١٢٩ حامض أميني. من مثل هذه المعلومات ومن إمكانية الحصول على أعداد هائلة من دقائق الفيروس وعزل الحامض RNA منها يمكن التحقق من الشفرة. على مدى عدة سنوات نجح و. فريز W.FRIES ومعاونوه من تحديد كل تتابع النيوكليوتيدات (٣٥٦٩) في الحامض RNA للفيروس MS2. جزء من النتائج التي توصلوا إليها مبين في الشكل ١٣-١٤.

يبدأ الجزيء بقطعة من١٣٢ نيوكليوتيدة لا تترجم الى ناتج بروتيني. يلي ذلك الجين (وطولة ١١٧٦ نيوكليوتيدة) الذي يحمل شفرة البروتين "A" (الذي يوجد به ٣٩٢ حامض أميني). ولتبسيط الشكل فان النيوكليوتيدة قبل الأخيرة في هذا الجين (رقم ١٣٠٧ من بداية الجزيء) قد أعطيت الرقم ١ في الشكل ١٣-١٤. النيوكليوتيدات أرقام ٣-٥ هي UAG وهي التي تنهى الترجمة للبروتين "A" وبعد ذلك يوجد إمتداد من ٢٣ نيوكليوتيدة (أرقام ٦-٢٨) لا تترجم. النيوكليوتيدات الثلاث التالية (أرقام ٢٩-٣١) هي AUG وهي علامة البداية لترجمة بروتين الغشاء. بعد ذلك وإبتداء من النيوكليوتيدة رقم ٣٢ نقرأ في مجموعات من ثلاث فنجد أن الحامض الأميني الذي تنبأنا به لكل ثلاثية في جدول الكودونات الموضح في الشكل ١٣-١٣ يشكل تتابعا هو نفس التتابع الذي حدده التحليل المستقل لبروتين الغشاء. بعد الثلاثية رقم ١٢٩ مباشرة تظهر الثلاثية UAA والثلاثية UAG (الشكل ١٣-١٤). وكل منهما لها مهمة إنهاء السلسلة. (غيرمعروف سبب إستعمال إختتامين). يلي ذلك تتابع من ٣٠ نيوكليوتيدة غير مترجمة ثم كودون باديء initiator codon هو AUG يليه ١٦٣٢ نيوكليوتيدة تترجم الى إنزيم البلمرة RNA polymerase والمختتم UAG terminator. القطعة المتبقية من الجزيء عبارة عن ذيل "tail" من ١٧١ نيوكليوتيدة غير مترجمة.

الذي فعله فريز ومساعدوه إذن هو أنهم كشفوا عن محتوي المعلومات الشفرية لثلاثة جينات كاملة بما في ذلك علامات البدء و الختام. بالنسبة لأثنين من هذه الجينات (جين البروتين "A" و جين بروتين الغشاء) فأن التحليل المستقل لنواتجهما عديدة الببتيد جاء مطابقا بدون استثناء لتوزيع الكودونات المبين في الشكل ١٣-١٣. وبأنجازهم هذا العمل التاريخي فأن هؤلاء الباحثين يكونوا قد أكدوا بطريقة مباشرة صحة الشفرة الوراثية ومن ثم يكونوا قد وضعوا واحدة من أخطر إنجازات القرن العشرين على أسس



الشكل ١٣-١٤. تتابع النيوكليوتيدات في جزء من الحامض RNA بالفيروس البكتيري MS2. هذا التتابع يشمل : (١) الجين الكامل لبروتين غشاء الفيروس (الكودونات ١-١٢٩) و (٢) اشارات بدئه وختامه و (٣) أجزاء من الجينات التي تسبقه و التي تليه و (٤) أقسام غير مترجمة على جانبي كل من الجينات الثلاث. تحليل البروتينات التي تخلقها هذه الجينات أكد أن توزيع المهام على الكودونات كما هو موضح في الشكل ١٣-١٣ صحيح بلا استثناء. تستعمل كل الكودونات المترادفة ما عدا ١٢ في جين بروتين الغشاء. تحليل الجين السابق عليه كشف عن الـ ١٢ كودون الباقية وعلى ذلك فان الفيروس MS2 (مثل عائلة بكتيريا القولون) يستعمل كل كودون ممكن حتى ولو كان بعضها عاطل. حصل على هذه المعلومات و. فريز ومساعدوه.

لا يمكن زعزعتها.

هل الشفرة شاملة؟ بصفة عامة نعم. نفس الكودونات مخصصة لنفس الأحماض الأمينية ولنفس إشارات البدء والختام في مثل تلك الكائنات المتباعدة كبكتيريا القولون والخميرة ونبات الدخان وحيوان أبو ذنيمة والفأر والأرنب وخنزير غينيا. وكما ترى في الشكل ١٣-١٣ فان كل الأحماض الأمينية تقريبا يتم التشفير لها بأكثر من كودون واحد. أي هذه الكودونات البديلة لحامض أميني معين هو الذي يستعمل غالبا قد يختلف من نوع الى نوع بل من جين الى جين.

على الرغم من أن كل الكائنات حقيقية النواه التي درست تستعمل نفس الشفرة لجيناتها النووية فقد إكتشف حديثا أن الشفرة تختلف قليلا في الميتوكوندريا. فالميتوكوندريا بها كمية ضئيلة من DNA وهي تقوم بنسخه الى الأحماض rRNA , tRNA وعدة جزيئات مختلفة من mRNA الخاصة بها. وهي تستخدم هذه الجزيئات في تخليق القليل من بروتيناتها بنفسها ثم تؤمن بقية بروتينها من سيتوبلازم الخلية التي توجد فيها.

عند وضع الحامض mRNA من الميتوكوندريا في أنبوبة إختبار مع بقية المواد اللازمة لتخليق البروتين (أحماض أمينية و إنزيمات والحامض tRNA والريبوسومات . . . إلخ) فانه يفشل في بناء بروتينات عادية. أحد أسباب ذلك أن الميتوكوندريا تستخدم الكودون UGA كشفرة للحامض الأميني تريبتوفان Tryptopan (Try) بدلا من إستخدامه كمختتم للسلسلة. على ذلك عند ترجمته بالاليات السيتوبلازمية فان التخليق يتوقف كلما إلتقي بكودون التريبتوفان. بالأضافة الى ذلك فان ميتوكوندريا الثدييات تستخدم الكودون AUA للميثيونين methionine بدلا من إستخدامه للايزوليوسين isoleucine كما تستخدم الكودونات AGG, AGA كمختتم للسلسلة. في ميتوكوندريا الخميرة جميع الكودونات التي تبدأ ب CU تستخدم كشفرة للثريونين thrionine بدلا من الليوسين. ومع ذلك فهي ما زالت قادرة على إستعمال الكودونات UUG, UUA كشفرة لليوسين مثلما تفعل كل جزيئات mRNA الموجودة في السيتوبلازم.

١٣-٧. فعل الطراز الجيني الكلي

THE ACTION OF THE ENTIRE GENOME

لقد كان مندل يدرك أن فهم قواعد الوراثة لا يأتي إلا من دراسة صفات بسيطة ومحددة. وقد إتبعت غالبية البحوث التالية بالضرورة نفس التقليد. معظم المعلومات التي ناقشناها في هذا الباب جاءت من دراسة أنظمة وراثية مبسطة (مثل الفيروس MS_2) ومع ذلك فالصفات المحددة مثل نوع الهيموجلوبين ووجود إنزيم فعال واحد تمثل جزءا صغيرا من كيفية توجيه نشأة ووظيفة الكائن. المكتبة الوراثية الكاملة للكائن تسمى الطراز الجيني genome وحتى الأن فان علم الوراثة لم يقدم إلا بداية العلاقة بين الكائن وطرازه الجيني. ومع ذلك فقد برزت ثلاثة مبادىء هامة.

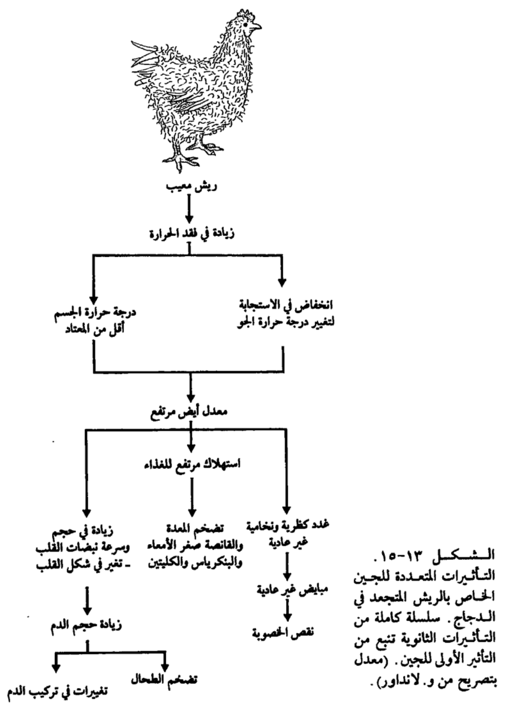
١- التأثيرات المتعددة لجينات مفردة : MULTIPLE EFFECTS OF SINGLE GENES

قد يكون للجين المفرد تأثيرات عديدة.على الرغم من أن الجين الواحد ينتج عديد ببتيد واحد (عادة) فان نشاط عديد الببتيد هذا (أو البروتين الذي هو جزء منه) في الأجزاء المختلفة من الكائن قد يؤدي الى تأثيرات مختلفة. بالأضافة الى ذلك فان التأثيرات الناتجة في أحد أجزاء الكائن كنتيجة مباشرة لفعل الجين قد تخل بدورها بالتوازن الطبيعي في أجزاء أخرى من الكائن. وعلى ذلك فقد يترتب على الفعل الأولى لأحد الجينات سلسلة كاملة من التغيرات التركيبية والوظيفية. يتضح ذلك في توارث الصفة المسماه التجعد الهش Frizzling في الدجاج. ريش الدجاج متشابه اللاقحة في هذه الصفة يكون سهل الكسر ويقدم القليل من العزل الحراري للطائر ومن المحتمل أن تكون الجينات المتضادة منتجة لبروتين لا يسمح بالنمو الطبيعي للريش. والعزل الحراري السيء للريش الهش يؤدي الى زيادة فقد الطائر للحرارة وهذا بدوره يبدأ سلسلة كاملة من التغيرات التركيبية و الوظيفية (الشكل ١٣-١٥). يوضح ذلك المبدأ أيضا الأعراض العديدة المصاحبة للكثير من الأمراض الوراثية في الأنسان مثل نقص الأصباغ ومعامل الذكاء (IQ) شديد الأنخفاض في الأفراد المصابين بمرض فينايل كيتونوريا. نشأة عدة تأثيرات عن جين واحد تسمى التأثير السباعي pleiotropy.

٢- تفاعل الجينات THE INTERACTION OF GENES

قاعدة ثانية هي أن التعبير عن أي صفة يتأثر بعدد كبير من الجينات. فجين واحد قد يؤدي الى إحمرار لون زهرة البسلة بدلا من كونها بيضاء ولكن العديد من الجينات الأخرى تكون لازمة لأعطاء البتلات تركيبها وترتيبها. وأبعد من ذلك فانه لا يمكن التعبير عن صفة لون الزهرة بدون النشاط المنسق لعدة جينات توجه نشأة وتكوين الجذور والسوق والأوراق.

حتى الصفات البسيطة مثل القدرة على أيض جزيء صغير مثل فينايل ألانين (الشكل ١٣-٣) تتطلب نشاط عدد من الأنزيمات وكل من هذه يتكون من سلسلة واحدة أو أكثر من عديد الببتيد والتي يتم تخليق كل منها بدورها بواسطة جين معين. وقد أوضحت الدراسات التي أجريت على عدد من الكائنات الدقيقة أن بعض حالات



الشكل ١٣-١٥. التأثيرات المتعددة للجين الخاص بالريش المتجعد في الدجاج. سلسلة كاملة من التأثيرات الثانوية تنبع من التأثير الأولى للجين. (معدل بتصريح من و. لانداور).

الجينات المسئولة عن تخلق إنزيمات متشابهة تكون متجاورة على الكروموسوم. فمثلا في بكتيريا القولون *E.coli* تكون الجينات المنتجة للأنزيمات اللازمة لأيض ثنائي التسكر لاكتوز متجاورة على جزء واحد من كروموسوم الكائن. وعند إحدي نهايات هذه

السلسلة من الجينات يوجد جين خاص بالتشغيل وهو الذي يشغل الأخرين أو يوقفهم عن العمل حسبما تمليه ظروف الخلية. مجموعة جين التشغيل والجينات التي يتحكم فيها تسمى أوبرون operon. من المؤكد أن الترابط الوثيق بين الجينات ذات العلاقات الوظيفية يخدم الكائن. عن طريق تجميع مثل هذه الجينات في أوبرونات فان إنتاج كل الانزيمات اللازمة لنشاط أيضي معين يستمر تلقائيا وبكميات منسقة بدقة.

كم عدد الجينات اللازم لبناء كائن؟ لا أحد يعرف بدقة. فقد يستطيع المرء تقدير كمية الحامض DNA الموجودة في خلية من خلايا الكائن (وهي عامة تزيد بزيادة تعقد الكائن) ومنها يحسب أزواج القواعد الموجودة فيها. الخلية الثديية النموذجية تحتوي على حوالي ٥ × ١٠^٦ من أزواج القواعد في مجموعة ثنائية من الكروموسومات. هذا يكافيء طول إجمالي مقداره حوالي ١،٧ متر وهي أكثر من ١٠٠٠ ضعف الكمية الموجودة في بكتيريا القولون ولكن هل عدد الجينات في الثدييات يساوي ١٠٠٠ ضعف عددها في بكتيريا القولون؟ ربما لا.

دعنا نفترض أن كل جين يحمل شفرة لعديد ببتيد طوله في المتوسط ٥٠٠ حامض أميني. ذلك يتطلب ١٥٠٠ من أزواج القواعد فأذا قسمنا ٥ × ١٠^٩ على ١٥٠٠ حصلنا على قيمة ٣,٣ × ١٠^٩ من الجينات المختلفة. ولكن هذا التقدير مبني على أساس الأفتراض الأضافي أن كل الحامض DNA الموجود في الخلية نشط وراثيا. وقد ثبت الأن أن الحالة ليست كذلك. خلايا الكائنات حقيقية النواه تحتوي على كميات متغيرة ولكنها دائما كبيرة من الحامض DNA المتكرر - أي تتابعات متماثلة أو على الأقل متشابهه تتكرر مرة بعد مرة. بعض هذا الحامض DNA المتكرر يكون نشطا وراثيا ولكنه يمثل نسخ متعددة من جين واحد (مثل جينات الهستون) ولكن الكثير منه لا يبدو له نشاط وراثي وما زالت وظيفته محل تخمين وقد يلعب أدوارا هامة في تعبئة الجينات وتشغيلها أو إيقافها عن العمل. لذلك فان هناك إحتمال متزايد بأن هناك جزء كبير من الطراز الجيني في الكائنات حقيقية النواه لايتم التعبير عنه أبدا بانتاج بروتينات. ربما لا يتم نسخ أكثر من ٢٥٪ من الحامض DNA الموجود في النواه وربما لا تتم ترجمة إلا ١٠٪ فقط مما تم نسخه في السيتوبلازم. وفي المثال الحالي إذن يكون لدينا تقدير مبدئي بحوالي ٤٠٠٠٠ جين في طراز جيني أحادي haploid.

بالنسبة لبكتيريا القولون فالموقف أوضح. هذه البكتيريا ليس بها حامض DNA متكرر وفيما عدا الجينات الخاصة بالحامض rRNA لا يوجد تعدد في نسخ الجينات. في ١ مم من الحامض DNA تحتوي بكتيريا القولون على حوالي ٢٠٠٠ جين. أما بالنسبة لذبابة الفاكهة فيبدو أن الرقم متوسط: حوالي ٥٠٠٠ جين (و هو رقم يقارب مجموع الشرائط التي تشاهد على الكروموسومات العملاقة)

٣- تأثيرات البيئة على فعل الجين ENVIRONMENTAL INFLUENCES ON GENE ACTION

القاعدة الثالثة هي أن فعل الجينات يعتمد أيضا على البيئة. القدرة على تصنيع الكلوروفيل تقع تحت سيطرة جين ولكن النباتات لا تستطيع أداء المهمة دون أن تتعرض للضوء (إرجع الى الشكل ٨-١١). إذا كان من السهل التعرف مبكرا على ضحايا المرض الوراثي لفينيل كيتونوريا (PKU) فانه ممكن منع الجينات المتطفرة من التعبير عن نفسها ويتم ذلك بانقاص كمية الحامض الأميني فينيل ألانين في غذاء المرضي.

وعلى ذلك فالجينات التي يرثها كائن تحدد إحتمالات ما يمكن إنجازه طوال مجري نشأته ونموه. أما البيئة فتحدد الدرجة التي يتم بها إنجاز هذه الأحتمالات.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تتابع النيوكليوتيدات في الحامض DNA يملي تتابع الأحماض الأمينية في عديد الببتيد. كل حامض أميني سيدخل الى عديد الببتيد يتحدد بواسطة تتابع من ثلاث نيوكليوتيدات تشكل فيما بينها كودون. تتم العملية على مرحلتين : (١) النسخ لحلزون الحامض DNA الى حلزون من الحامض المراسل mRNA و (٢) الترجمة للحامض mRNA الى عديد الببتيد. ترجمة الحامض mRNA تتطلب ريبوسومات وحامض ناقل tRNA وعديد من الأنزيمات. كل من النسخ والترجمة يعتمد على إزدواج القواعد في النيوكليوتيدات المتكاملة.

يمكن ترتيب أربع أنواع من النيوكليوتيدات في ٦٤ تتابع مختلف مكون من ثلاث نيوكليوتيدات وبذلك ينشأ ٦٤ كودون مختلف. كل الكودونات الممكنة مستعملة في

الكـائنـات الحية ومنهم ٦١ كودون تحدد أحمـاضا أمينية. كل من الأحماض الأمينية العشرين التي تدخل في تخليق البروتينات يتحدد بواسطة كودون واحد أو عدة كودونات ولكن لا يوجد كودون واحد يحدد أكثر من حامض أميني واحد. تعمل ثلاث كودونات كاشارات لختام الترجمة. بسبب التذبذب تستطيع بعض جزيئات tRNA الألتحام مع ٢ أو حتى ٣ كودونات mRNA تختلف عن بعضها في المكان الثالث.

في الكائنات حقيقية النواه يحدث النسخ في النواه والناتج (ويسمى النسخة الأولية) يكون عادة أضخم بكثير من جزيء mRNA الذي ستتم ترجمته. العديد (وليس كل) من قطع الحامض RNA التي لن تترجم تنفصل عن النسخة الأولية والقطع الشفرية البـاقية تتـلاحم أطـرافهـا لتكوين جزيء حـامض mRNA الناضج وهذا ينتقل الى السيتوبلازم حيث تتم ترجمته بآليات الريبوسومات.

هنـاك كودونـات عديدة في الحامض DNA بالميتوكوندريا (على الأقل في الثدييات والخميرة) تختلف في تخصصاتها عن الكودونات المستعملة في الحامض DNA بالنواه.

قسم كبـير من الطفرات يتضمن استبدال نيوكليوتيدة بأخرى في الحامض DNA. بعض هذه الطفرات صامتة لأن الكودون الجديد يحمل شفرة نفس الحامض الأميني ومـع ذلـك فعنـدمـا يتخصص الكـودون الجـديد فـي حامض أمينـي مختلف فـان عديد الببتيد النـاتج من الجين يتغير. الجين المتطفر هو جين مضاد للجين الأصلي. بعض الجينـات في نوع ما (مثـل الجينـات الخـاصـة بالسلسلة بيتا في هيموجليوبين الأنسان) توجد في عدة صور متضادة. ومع ذلك فان أي فرد لايوجد به إلا إثنان على الأكثر من الجينات المتضادة لأي مكان locus في العشيرة.

معظم الجينات سباعية التأثير pleiotropic أي أن الناتج الأولى للجين (وهو عديد الببتيد) ينتج عددا من التأثيرات المختلفة على الطراز المظهري. وبالعكس تتأثر معظم صفات الطراز المظهري بعدد من الجينات المختلفة. الطراز المظهري لكائن يتأثر كذلك بالبيئة التي يحدث بها التعبير عن الجينات.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ فرق بين العوامل المتعددة والجينات المتضادة المتعددة.

٢ ــ مع إهمال العبور كم عدد الأنواع المختلفة من الجراثيم الأسكية يمكن لفطر *Neurospora crassa* أن ينتجها بالتوزيع العشوائي لكروموسوماته؟ العدد الأحادي للكروموسومات هو ٧.

٣ ــ الى جانب الحامض DNA والحامض RNA ماهي المواد الحيوية الهامة الأخرى التي تحتوي على المادة البيورينية أدنين؟

٤ ــ هل صحيح القول بأن الكيس الأسكي الذي ينتجه زيجوت فطر *Neurospora* متباين اللاقحة (Aa) فيه ٤ جراثيم تحمل A و أربعة تحمل a ؟إشرح.

٥ ــ لماذا يمكن عمل تنبؤ محدد في السؤال الرابع بينما لم تتمكن من عمل تنبؤمحدد في السؤال الرابع عند نهاية الباب ١٠؟

٦ ــ ماهو تتابع القواعد في الحامض mRNA يتم تشفيره بالثلاثيات الأتية في جزيء الحامض DNA: AGT, AAA, CCA, GAT, GCT.

٧ ــ لماذا كانت الكائنات أحادية العدد الكروموسومي مفيدة بصفة خاصة في الدراسات الوراثية؟

٨ ــ لماذا كانت معظم الطفرات متنحية؟

٩ ــ ماهي الأيونات غير العضوية التي تتوقع أن تضيفها الى السكروز والبيوتين لعمل وسط غذائي به الحد الأدنى من متطلبات نمو فطر نيوروسبورا غير متطفر؟ لماذا؟

١٠ ــ الوسط الغذائي الأدنى لفطر نيوروسبورا يتطلب وجود البيوتين بينما الوسط الأدنى لبكتيريا القولون لا يتطلب ذلك؟ هل يعني هذا أن البيوتين لا يشارك في أيض خلايا بكتيريا القولون؟ إشرح.

١١ ــ عرف الجين. هل هذا هو نفس تعريفك له عند نهاية الباب ١٠ والباب ١١؟

١٢ ــ مستخدما معلوماتك عن الأنقسام الأختزالي ما هي تنظيمات الجراثيم A والجراثيم a التي يمكن أن توجد في كيس أسكي أنتجته سلالة من فطر نيوروسبورا متباين اللاقحة لهذين الجينين المتضاديين؟

١٣ ــ الجين الأول في الفيروس MS2 ينتهي بإشارة ختام UAG مبينة كنيوكليوتيدات أرقام ٣، ٤، ٥ في الشكل ١٣-١٤. الجين التالي يبدأ ب AUG

عند المواضع أرقام ٢٩ ، ٣٠، ٣١ - هل عدد النيوكليوتيدات في المنطقة بين الجينين يقبل القسمة على ٣؟

١٤ ــ بعض فيروسات MS2 تخطيء أحيانا في قرأءة إشارة الختام UAG (المواضع ٣، ٤ ، ٥ في الشكل ١٣-١٤) وبدلا من التوقف عن ترجمة الجين الأول فانها تحشر الحامض الأميني سيرين (Ser) عند هذه النقطة وتستمر في الترجمة. مع أخذ اجابتك عن السؤال السابق في الأعتبار ماهي إشارة «قف» المحتملة بعد ذلك؟

١٥ ــ بأستخدام جدول توزيع المهام على الكودونات (الشكل ١٣-١٣) أذكر تتابع الأحماض الأمينية في الجزء الزائد الشاذ من البروتين الذي تم تخليقه في السؤال السابق (تم التأكد من وجود مثل هذا البروتين).

المراجع REFERENCES

1- BEADLE, G.W. "The Genes of Men and Molds," Scientific American, Offprint No. 1, September, 1948. The techniques of using Neurospora as a tool for studying action are described in detail.

2- PETERS, J. A., ed., Classic Papers in Genetics. Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1959. Includes the original papers on the discoveries made by H. J. Muller, Beadle and Tatum, Avery and his co-workers, and Watson and Crick. Other papers on the nature and action of genes are also included.

3- FRIEDMAN, M. J., and W. TRAGER, "The Biochemistry of Resistance to Malaria," Scientific American, Offprint No. 1493. The story of a sickle-cell anemia.

4- LAKE, J. A., "The Ribosome," Scientific American, Offprint No. 1501 August, 1981. Includes a detailed discussion of the mechanism of protein synthesis.

5- MILLER, O. L. JR., "The Visualization of Genes in Action," Scientific American, Offprint No. 1267, March, 1973.

6- LANE, C., "Rabbit Hemoglobin from Frog Eggs," Scientific American,

Offprint No. 1343, August., 1976. How Xenopus eggs translate messenger RNA injected to them.

7- NIRENBERC, M.W., "The Genetic Code II," Scientific American, Offprint No. 153, March, 1963. Explains how synthetic messenger RNA was used to determine the "letter" in the genetic code.

8- GORINI, L., "Antibiotics and the Genetic Code," Scientific American, Offprint No. 1041, April, 1966. Summarizes the mechanism of protein synthesis and shows how certain antibiotics interfere with the process by causing errors in the translation of the genetic code.

9- RICH, A., and S.H. KIM. "The Three - Dimensional Structure of Transfer RNA," Scientific American, Offprint No. 1377, January, 1978.

10- WATSON, J.D., Molecular Biology of the Gene. 3rd ed., Benjamin, Menlo Park, Calif., 1967. Already a classic, this superb book was written by the codiscoverer of the structure of DNA. It includes discussions of the molecular genetics of *E. coli* and both DNA and RNA bacteriophages.

CHAPTER 14 الباب الرابع عشر

ترتيب المعلومات الوراثية

THE ORGANIZATION OF GENETIC INFORMATION

الباب الرابع عشر
ترتيب المعلومات الوراثية

ربما كانت اكثر الاكتشافات إثارة في علم الاحياء منذ صدرت الطبعة السابقة من هذا الكتاب هي في مجال بحوث الحامض DNA. في السنوات القليلة الماضية تحقق تقدم فائق السرعة في عزل الجينات وفك رموزهم وتناولهم في المعمل. واستحدثت طرق لغرس جينات معينة في خلايا أجنبية ثم تضاعفهم فيها بنجاح ونسخهم وترجمتهم.

جاء قدر هائل من المعلومات نتيجة هذا التقدم حول ترتيب المعلومات الوراثية في الخلايا حقيقية النواه. هذه المعلومات ليست مذهلة فقط ولكنها ايضا تعطي الامل في تحقيق الكثير من المكاسب في مجالات الطب البشرى والطب البيطري والزراعة. ويتم الان تصنيع امصال جديدة وبروتينات مفيدة أخرى مثل هرمونات الانسان حسب الطلب بواسطة وسائل الهندسة الوراثية. ومازال في الافق استخدام هذه الوسائل لتصحيح العيوب الوراثية بل ووضع وظائف وراثية جديدة تماما. لم يكن أي من هذا ممكنا بدون وسائل فك رموز الجينات نفسها.

١٤-١ . قراءة الجينات : دراسة تتابع الحامض DNA

READING GENES : DNA SEQUENCING

تستخدم معظم الكائنات الحامض DNA لتخزين معلوماتها الوراثية. وحتى يمكن قرأة هذه المكتبة الوراثية فاننا.نحتاج الى طريقة لتحديد تتابع النيوكليوتيدات في الحامض DNA. في خلال فترة وجيزة بعد العمل الضخم الذي قام به فريز لفك رموز الحامض RNA (انظر القسم ١٣ - ٦) استحدثت طرق لقرأة جينات الحامض DNA. طبقت هذه الوسائل أولا على فيروسات DNA لأن جزيئاتها من الحامض DNA صغيرة

نسبيا ويسهل تنقية كميات كبيرة منها. كان اول فيروس يتم تحديد التتابع في حامضه DNA هو الفيروس البكتيري المسمى Ø X 174 وقد تم هذا العمل في معمل فريدريك سانجر (الذي قام بتحديد الأحماض الأمينية في الانسولين قبل ذلك بثلاثة وعشرين عاما - ارجع الى القسم ٤-٤).

ينمو الفيروس Ø X 174 في بكتيريا القولون. حامضه النووي DNA يتكون من جزيء واحد به ٥٣٨٦ نيوكليوتيدة. هذا يساوي ٠,٠٠١ من حجم جزيء الحامض DNA الذي يحمل جينات بكتريا القولون كما يساوي جزء في المليون من حجم المكتبة الوراثية في خلية انسان. ومع ذلك فان هذا الجزيء اكبر من ان يدرس التتابع فيه كقطعة واحدة.

من أجل دراسة التتابع في أحماض DNA من هذا الحجم لابد من تقطيعها اولا الى قطع اصغر. الكثير من الانزيمات الهاضمة للحامض DNA يمكنها تحقيق ذلك ولكن اغلبها لا يصلح لاغراض دراسة التتابع لانها تقطع كل جزيء عشوائيا وهذا يؤدي الى انتاج مجموعة عشوائية من القطع ذات الاحجام المتباينة. المطلوب هو طريقة لتقطيع جزيء الحامض DNA عند مواضع قليلة محددة بكل دقة بحيث ينتج مجموعة صغيرة متجانسة من القطع (١٤ - ١). المعدات اللازمة لذلك هي الانزيمات المسماة بإندونيوكلييزات التقييد (الشكل ١٤ - ١).

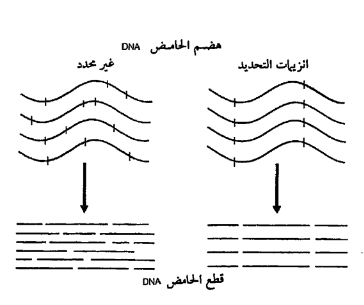
اندونيوكلييزات التقييد RESTRICTION ENDONUCLEASES

اندونيوكلييزات التقييد هي انزيمات لتقطيع الحامض DNA الموجود في البكتيريا. والذي يجعل منهم معدات هامة هو ان كل منهم يتعرف على ويقطع خيوط الحامض DNA فقط عند تتابع معين من النيوكليوتيدات. فمثلا البكتريا *Hemophilus aegypticus* تنتج انزيما - يسمى Hae III- يشطر الحامض DNA كلما صادفه التتابع 5´ GG CC 3´

يحدث الإنشطار بين القاعدتين C , G المتجاورتين وإذا كان الحامض DNA موجودا في صورة حلزون مزدوج فان الخيطين ينقطعان.

5´ GG ↓ CC 3´

3´ CC ↑ GG 5´



الشكل ١٤-١. الى اليسار: الهضم العشوائي للحامض DNA ينتج مجموعة من القطع غير متجانسة لدرجة أنه لايمكن تنقيتها ودراستها الى اليمين : لأن أنزيمات التقييد تقطع الحامض DNA عند نقاط معينة فان الهضم بها ينتج مجموعات من القطع المتجانسة. كلما كانت المواقع التي يتعرف عليها انزيم التقييد نادرة كلما قل عدد القطع التي ينتجها.

يحدث هذا التتابع بالذات عند ١١ موضع على الجزيء الحلقي للحامض DNA في الفيروس Ø X 174 ولذلك فان معاملة الفيروس بهذا الانزيم تنتج ١١ قطعة مختلفة لكل منها طول محدد وتتابع ثابت للنيوكليوتيدات. يمكن فصل هذه القطع عن بعضها وتحليل التتابع في كل منها.

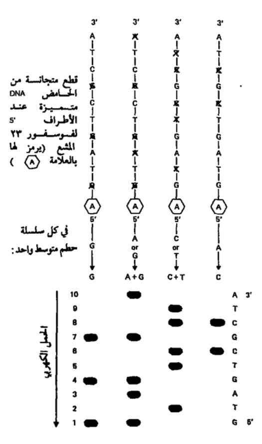
التتابع في الحامض DNA SEQUENCING DNA

تم تطوير ثلاث طرق لتحديد الترتيب الدقيق للنيوكليوتيدات في قطعة من الحامض DNA اثنتان منها (وهما المستعملتان في تحديد التتابع في الفيروس) تم تطويرهما في معمل سانجر. تستعمل طريقة انزيم DNA polymerase لانتاج نسخ من الخيوط المطلوب تحديد التتابع فيها ولذلك تسمى بالطرق «الانزيمية». الطريقة الثالثة تستعمل مركبات غير عضوية لتقطيع الحامض DNA عند نقاط معينة وقد تم تطوير هذه الطريقة الكيميائية بواسطة ماكسام وجيلبرت في جامعة هارفارد.

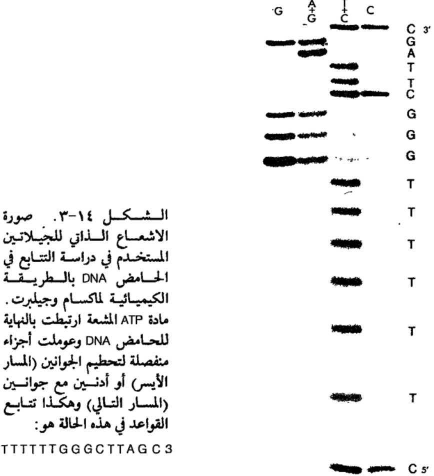
الخطوة الاولى في الطريقة الكيميائية هي التحام جزيء مشع من ATP عند احدى نهايتي (اما ´٣ او ´٥) كل من الخيطين في القطعة ثم فصل هذه القطعة الى خيوط مفردة ثم تجزئة هذه المادة الى ٤ اجزاء. يعامل كل جزيء بمادة كيميائية تحطم قاعدة أو

قاعدتين معينتين في الخيط. طريقة شائعة هي استعمال مادة كيميائية تحطم السيتوزين (C) فقط و مادة تحطم السيتوزين والثايمين معا (C + T) ومادة تحطم الجوانين فقط (G) ومادة تحطم الادنين والجوانين معا (A + G) في الخيط. ويكون التحكم كاملاً في التفاعل الكيميائي في كل حالة بحيث يتقطع الخيط في مكان واحد فقط. ومع ذلك فان تحطيم كل نوع من النيوكليوتيدات (مثل C) يحدث عشوائيا على كل طول السلسلة وتكون النتيجة خليط من القطع مختلفة الاطوال وكل منها مشع. بتحديد طول كل قطعة بعدد النيوكليوتيدات الباقية بين قطعة التقطيع والطرف المشع (الشكل ١٤-٢).

يوضع خليط القطع بعد ذلك في وسط نصف صلب ويجري له حمل كهربي. يتم توصيل تيار مستمر في هذا الوسط وبسبب الشحنات السالبة على مجموعات الفوسفات تنسحب النيوكليوتيدات نحو القطب الموجب. كلما كانت القطعة صغيرة كانت هجرتها في هذه الخطوة أبعد. وعلى ذلك تكون النيوكليوتيدات المفردة mononucleotides



الشكل ١٤-٢. الطريقة الكيميائية لدراسة التتابع في الحامض DNA. على الرغم من أن التقطيع تم عشوائيا (عند المواضع X) فعادة ما تتكسر القطعة الواحدة مرة واحدة. اذا انكسرت احدى القطع مرتين فان القطعة التي تحمل ATP المشع فقط هي التي تبدو في صورة الاشعاع. قام أ. م. ماكسام و و. جيلبرت بتطوير هذه الطريقة في جامعة هارفارد.

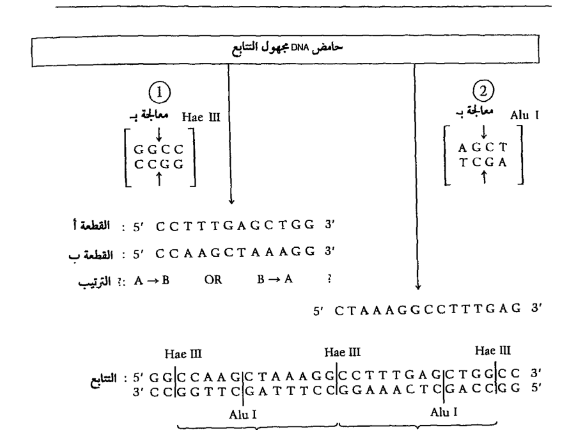


الشكل ١٤-٣. صورة الاشعاع الذاتي للجيلاتين المستخدم في دراسة التتابع في الحامض DNA بالطريقة الكيميائية لماكسام وجيلبرت. مادة ATP المشعة ارتبطت بالنهاية للحامض DNA وعوملت أجزاء منفصلة لتحطيم الجوانين (المسار الأيسر) أو أدنين مع جوانين (المسار التالي) وهكذا تتابع القواعد في هذه الحالة هو:

CTTTTTTGGGCTTAGC 3

(بتصريح من دافيد دريسلر).

اكثر القطع انتقالا وتأتي بعدها النيوكليوتيدات الثنائية dinucleotides وهكذا. توضع لوحة الحمل الكهربي electrophoretogram على فيلم تصوير لتصوير الاشعاع الذاتي autoradiography حيث يتعرض الفيلم للاشعاع أينما توجد قطع مشعة. تصطف لوحات الحمل الكهربي لكل من التفاعلات الاربعة جنبا الى جنب، بمجرد عمل ذلك فانه يمكن قراءة تتابع النيوكليوتيدات مباشرة (الشكل ١٤ - ٣). تتحدد المواضع التي يوجد بها الادنين (A) على الجزيء بتحديد المواضع في لوحة الحمل الكهربائي للادنين والجواني معا (A + G) والتي لاتظهر في لوحة الحمل الكهربائي للجوانين (G) فقط.



الشكل ١٤-٤ . تحديد الترتيب للقطع التي درس التتابع فيها على انفصال من الحامض DNA. باستخدام انزيم تقييد ثاني (Alu I) تنتج قطعة يعبر التتابع فيها القطع الناتجة من استخدام الانزيم Hae III وبذلك يمكن تحديد ترتيبهم في الجزيء الأصلي.

وبالمثل تتحدد المواضع التي يوجد بها الثايمين (T) بتحديد المواضع التي يوجد بها السيتوزين والثايمين (C + T) معا وليست موجودة في لوحة السيتوزين (C) فقط (الشكل ١٤-٣). وبشيء من الحرص يمكن تحديد التتابع في قطع يصل طولها الى ٢٠٠ نيوكليوتيدة من مجموعة واحدة من لوحات الحمل الكهربي.

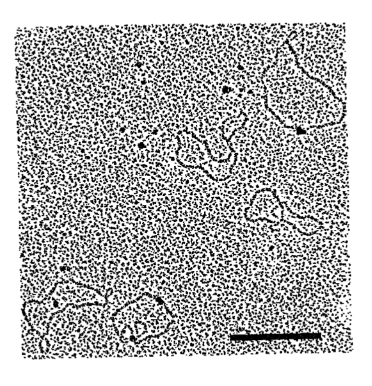
من اجل تحديد التتابع في الجزيء الكامل للحامض DNA فلابد من تحديد ترتيب القطع المختلفة في الجزيء كله . وهذا ممكن عن طريق تحديد التتابع في قطع ناتجة من استعمال إنزيم تقييد مختلف restriction endonuclease حيث أن الجزيء قد تقطع الان عند موضع مختلف فان التتابعات في المجموعة الثانية من القطع سوف تتراكب مع تتابعات المجموعات الاولى (الشكل ١٤-٤).

الكثير من الجينات التي عرف التتابع فيها تحمل شفرة بروتينات كان قد تم تحديد تتابع الاحماض الأمينية فيها . وقد أيدت النتائج تماما صحة الشفرة الوراثية . فالاحماض الامينية التي سبق التنبـوء بها من تتابع النيوكليوتيدات في الحامض DNA هي نفسها بالضبط المـوجـودة في البروتين نفسه . وهذا تاكيد مذهل لصحة الشفرة الوراثية على مستوي الحامض DNA. وفي الواقع فان السرعة والدقة الفائقة التي تتمتع بها طرق تحديد التتابع في الحامض DNA جعلت المشتغلين بهذه الطرق يحددون تتابع الأحماض النووية في البروتينات حتى قبل ان يتمكن علماء كيمياء البروتينات من ذلك .

على الرغم من أن تحديد التتابع في الحامض DNA يؤكد تماما الشفرة الوراثية فان توزيع المهام على الكودونات ليس كما هو مبين في الشكل ١٣-١٣ . فالمبين في هذا الشكل هم كودونات الحامض RNA وليس كودونات الحامض DNA. وبسبب التكامل Complementarity بين الخيطين في الحامض DNA فان هناك في الواقع مجموعتين من كودونات الحـامض DNA. جـزيئات الحـامض RNA يتم نسخها من خيط واحد فقط من خيـطي الحـامض DNA يسمى بخيط الشفرة Coding strand. عندما تتم قرأة الخيط الشفـرى في الاتجـاه ٣َ ← ٥َ فان كودوناته تحدد تتابع الكودونات على جزيء الحامض mRNA وهذه بدورها تحدد تتابع الاحماض الامينية على البروتين من النهاية ن الى النهاية س . ومـع ذلـك فقد تجد (مثلما وجد البعـض) انه من الملائـم قـراءة الكـودونـات المكافئـة (أو المتكاملة) على الخيط الاخر (او الخيط الضد شفري anticoding). عندما تتـم قراءة هذه الكودونـات من اليسار الى اليمين (من ٥َ الى ٣َ) فانها تعطي نفس كودونات الحامـض mRNA مع احلال الثايمين (T) محل اليوراسيل بالطبع (الشكل ١٤-٥) .



الشـكل ١٤-٥ . العلاقـة بين تتابع القواعد في خيطي الحامض DNA و تتابع القواعد في الحامض mRNA الذي يتم نسخه من الخيط الشفري للحامض DNA. يتم تخليق الحامض mRNA بواسطة انزيـم الحامض RNA بوليمريز الذي يقرأ الخيـط الشفـري للحامـض DNA في الاتجاه ٣ ← ٥ .



الشكل ١٤-٦. صورة بالمجهر الاليكتروني للحلزون المزدوج للحامض النووي DNA من الفيروس Ø X 174 معزول من خلايا بكتيريا القولون. الخط السميك يمثل نصف ميكرون. (بتصريح من الدكتور دافيد ت. دينهارت).

١٤-٢. الجينات المتراكبة OVERLAPPING GENES

كل دقيقة مُعدية كاملة من الفيروس Ø X 174 تتكون من غلاف بروتينى يغلف قلبا من البروتين والحامض DNA. غلاف الفيروس يحتوي على ٦٠ جزيء يتكون كل منها من نوعين من البروتينات (بروتين ف F وبروتين ج G) و ١٢ جزيء من بروتين آخر (البروتين هـ H) أما قلب الدقيقة الفيروسية فانه يحتوي على جزيء واحد من الحامض DNA و ٦٠ نسخة من بروتين رابع هو البروتين جى J. جزيء الحامض DNA احادي الخيط (SS-DNA) ويأخذ شكل حلقي وبه ٥٣٨٦ نيوكليوتيدة.

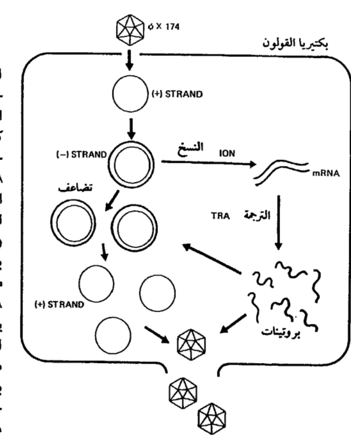
حينما يلتصق الفيروسØ X 174 بالعائل يدخل حامضه النووي DNA أحادي الخيط الى الخلية. هنا يعمل خيط الحامض DNA (+) كقالب لتخليق خيط (-) متكامل معة. يكون الخيطان معا حلزون مزدوج (الشكل ١٤-٦). يعمل الحلزون المزدوج بعد ذلك على مضاعفة نفسه عدة مرات بطريقة الالية النصف محافظه المبينة في الشكل ١٢-١٢.

الخيط السالب من جزيئات الحامض DNA يؤدي وظيفتين : (١) يعمل كقالب لتخليق جزيئات الحامض mRNA و (٢) يعمل كقالب لتخليق حوالي ٢٠٠ من الخيوط

المتكاملة معه (+) والتي يعبأ كل منها فيها بعد في قلب دقيقة فيروسية جديدة (الشكل ١٤-٤).

تقوم اليات تخليق البروتين في خلية العائل بترجمة جزيئات mRNA الفيروس الى عشرة انواع مختلفة من البروتينات. اربعة من هذه (وهم H, G, F, J) تدخل في تركيب دقائق الفيروس الجديدة. الانواع الستة الاخرى (وهم K, E, D, C, B, A) تلعب ادواراً اساسية في عملية التضاعف لكنها لا تصبح جزءا من دقائق الفيروس الجديدة.

تتراوح البروتينات العشر التي ينتجها الفيروس Ø X 174 في الحجم ما بين البروتين A (الذي يحتوي على ٥١٣ حامض اميني) الى البروتين الذي يحوي على ٣٨ حامض اميني فقط (الشكل ١٤-٨). تحتوي البروتينات العشر معا على ١٩٨٦ حامض اميني وهذا على الفور يثير تساؤل. اذا كان مطلوب ٣ نيوكليوتيدات لتحديد حامض اميني واحد فان الفيروس Ø X 174 يحتاج الى ٥٩٥٨ نيوكليوتيدة لتحديد ١٩٨٦ حامض اميني



الشكل ١٤-٧. دورة حياة الفيروس Ø X174 تتكون الدقيقة الفيروسية من كبسولة بروتينية تضم جزيء حلقي واحد من الحامض DNA وحيد الخيط. هذا الجزيء يحمل الشفرة الخاصة بعشر بروتينات (أنظر الشكل ١٤-١٠). بعض هذه البروتينات مطلوب لتضاعف الحامض DNA للفيروس وبعضها يدخل في تركيب الفيروسات الجديدة بينما أحدها يكون مسئولا عن تحلل الخلايا بحيث يسمح للفيروسات حديثة التخليق بالافلات منها.

الشكل ١٤-٨. البروتينات العشرة التي توجد الشفرة الخاصة بها في الطراز الجيني للفيروس ø X 174 البروتين الأكبر (أ) يشارك في تضاعف الحامض DNA الفيروسي. البروتينات (ف الى و) تدخل في تركيب دقائق الفيروس. البروتينات (ب-د) و (ك) تلعب دورا أساسيا (وان كان غامضا حتى الآن) في دورة حياة الفيروس. على الرغم من أن الطراز الجيني للفيروس ø X 174 يحتوي على ٥٣٨٦ نيوكليوتيدة فانه يحمل شفرة كل هذه البروتينات العشر وهو يقوم بذلك عن طريق قراءة نفس تتابع النيوكليوتيدات بعدة اطارات مختلفة للقراءة (أنظر الأشكال ١٤-٩ و ١٤-١٠).

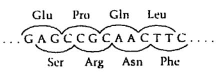
البروتين		عدد الأحماض الأمينية
A	أ	٥١٣
B	ب	١٢٠
C	س	٨٦
D	د	١٥٢
E	ع	٩١
F	ف	٤٢٧
G	ج	١٧٥
H	هـ	٣٢٨
J	و	٣٨
K	ك	٥٦
	المجموع	١٩٨٦

عدد النيوكليوتيدات اللازمة لحمل شفرة هذه البروتينات العشر : ٥٩٥٨
عدد النيوكليوتيدات الموجودة في الفيروس ø X 174: ٥٣٨٦

الفرق ٥٧٢

(٥٩٥٨ ÷ ٣ = ١٩٨٦) ولكن جزيء الحامض DNA فيه يحتوي على ٥٣٨٦ نيوكليوتيدة وهو ما يكفي لتحديد ١٧٩٥ حامض اميني فقط.

بالاضافة إلى ذلك فقد اتضح ان ٢١٧ من النيوكليوتيدات لا تقوم بتحديد اي شيء سوى ان بعضها يعمل كاشارات تحكم وبذلك يكون هناك ٥١٦٩ نيوكليوتيدة شفرية فقط ونتوقع ان تكون كافية لتحديد ١٧٢٣ حامض اميني فقط. كيف يتمكن الفيروس ø X 174 من إملاء عملية تجميع بقية الأحماض الأمينية؟ يقوم الفيروس بذلك عن طريق استخدام بعض تتابعات النيوكليوتيدات في تحديد تتابعين مختلفين من الاحماض



الشكل ١٤-٩. بتحريك اطار القراءة بمقدار نيوكليوتيدة واحدة الى اليمين يحمل نفس التتابع من النيوكليوتيدات الشفرة لتتابع مختلف من الأحماض الأمينية.

الامينية وهــذا يتضمن قراءة الكـودونـات في اطـارين مختلفـين للقـراءة اي تجميع النيوكليوتيدات في ثلاثيات منقولة (الشكل ١٤-٩). فمثلا التتابع.

..GAGCCGCAACTTC........

يمكن قراءته بثلاث اطارات مختلفة هي :

.GAG CCG CAA CTT C..........

أو .G AGC CGC AAC TTC ....

أو ..GA GCC GCA ACT TC ....

يستعمـل الفـيروس Ø X 174 اثنين من هذه الاطارات بالفعل وكما ترى فان كلا منها يحدد تتابع مختلف من الاحماض الامينية. وهناك مكان تشترك عنده نيوكليوتيدة واحدة (A) في ثلاثـة كودونـات مختلفـة: فهي النيوكليوتيدة الثـالثـة في الكودون (AAA) الخاص بالحامض الأميني الأخير (Lys) في البروتين A وهي النيوكليوتيدة الوسطى في الكودون AAT الـذي يحدد الاسباراجين (Asn) في البروتين K وهي النيوكليوتيدة الاولى في ATG وهو الكودون الذي يضع الميثيونين (Met) في بداية البروتين C (الشكل ١٤-١٠).

لقد امكن التعرف على الجينات المتراكبة في بعض الفيروسات الاخرى وفي بكتيريا القولون نفسها. ماهي أهميتها؟ أحد الاحتمالات (ولكنه ليس الوحيد بأي حال من الاحوال) انها ببساطة تعمل كوسيلة لرفع كفاءة اختزان المعلومات. الفيروس Ø X 174

بروتين أ : -- Gly - Lys - STOP

DNA: ...GGAAAATGAGAAAA...

بروتين ك : --- Glu - Asn - Glu - Lys ----

بروتين س : Met - Arg - Lys----

الشكـل ١٤-١٠. باستخدام كل من اطـارات القراءة الثلاثة المحتملة فان هذا الامتـداد من الحامض DNA من الطراز الوراثي للفـيروس Ø X 174 يستـطيـع أن يساهم في تخليق ثلاثة بروتينات مختلفة.

هو واحـد من أصغـر الفيروسات واستعماله للجينات المتراكبة يمكنه من زيادة كمية المعلومات التي يختزنها في كمية معينة من الحامض DNA.

١٤-٣. استزراع الجينات : الحامض DNA الهجين CLONING GENES: RECOMBINANT DNA

تحليل التتـابع في جينات الكائنات حقيقية النواة تكتنفه مشاكل خاصة. فالخلية النموذجية في الثدييات تحتوي علـى حوالي ٤ × ١٠⁹ من نيوكليوتيدات الحامض DNA. دعنا نفترض انك ترغب في تحديد التتابع في الجين الذي يحدد تركيب بروتين يحتوي على ٣٣٣ حامض أميني. هذا يعني أنك تبحث عن تتابع فريد من ١٠٠٠ نيوكليوتيدة موجودة في نسختين (في خلية ثنائية العدد الكروموسومي) وكل منها يتكون من خيط شفـري وخيـط ضـد شفـري. المشكلـة اذن هـي الحصـول علـى هـذا الجيـن الـذي يمثـل جـزء مـن مليـون جـزء (١ × ١٠⁻⁶) من الحامض DNA المـوجـود فـي الخليـة (٤ × ١٠³) ÷ (٤ × ١٠⁹). وهذا بحق كالبحث عن إبرة في كومة من القش. وحتى اذا استطعت الحصول على قطعة الحامض DNA التي تبحث عنها فانك ستواجه مشكلة انتاج نسخ طبق الاصل منها تكفي للحصول على المادة المطلوبة (ميلليجرامات قليلة) لتحليل التتابع.

دعنا الان نفحص بعض الخطوات التي يمكن بها حل هذه المشاكل. هذه الخطوات تشتمـل على تخليق جزيئـات حامـض DNA هجـين recombinant واستـزراع هذه الجزيئات في بكتيريا القولون.

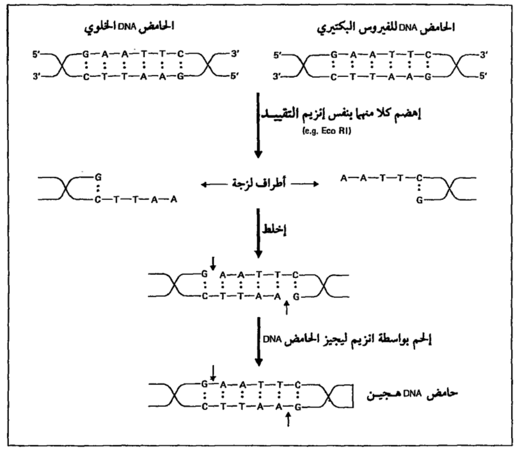
كما علمت من القسمين السابقين فان البكتيريا هي الات ذات كفاءة عالية في تجهيز اعداد كبيرة من نسخ متماثلة من الحامـض DNA الخاص بالفيروس البكتيري. وما ان يدخل الحامض DNA الفيروسي الى الخلية حتى يتضاعف عدة مرات وتعبأ النسخ على هيئة دقائق مسببة للعدوي تتحرر من خلية العائل وهي مستعدة لتكرار دورة العدوي. اذا استطعنا ان نلصق جيناً من حقيقيات النواه الى جزيء الحامض DNA الفيروسي فانه قد يتضاعف بنفس الطريقة. مرة اخرى نلجا الى إنزيمات التقييد. الانزيم ايكورا EcoRI هو أحـد إنزيمات التقييد التي تنتجها بكتريا القولون وهو يشطر الحامض DNA

فقط عندما يقابل التتابع

5´G ↓ A A T T C 3´

3´C T T A A ↑ G 5´

يتقطع كل خيط من الحلزون المزدوج بين الجوانين والادنين. وكلما حدث ذلك فان الاطراف المقطوعة من الحلزون المزدوج تحمل طولا زائد من اربعة نيوكليوتيدات من الحامض DNA غير المزدوج (أحادى الخيط). هذه تسمى بالاطراف اللزجة Sticky ends لأنها تستطيع أن تكون أزواج قواعد مع اي جزيء من الحامض DNA يحتوي على أطراف لزجة مكملة لها . وتتلخص الفكرة في معالجة الحامض DNA من



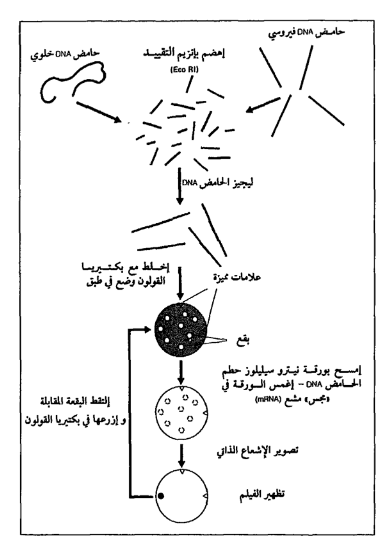
الشكل ١٤-١١ . تكوين الحامض DNA الهجين. عن طريق هضم كلا من الحامض DNA الخلوي والفيروسي بنفس انزيم القييد فانه يمكن ربط الأطراف اللزجة لكل منها بواسطة ازدواج القواعد. يعمل انزيم ليجيز الحامض DNA على اعادة تكوين روابط تساهمية (مشار اليها بأسم) في كل خيط.

حقيقيات النـواه والحامض DNA من الفيروس البكتيري بنفس انزيم التقييـد لخلق اطراف لزجة على كل منهما تكون متكاملة. وعندخلطهما معا تحت الظروف المناسبة فان جزيئـات الحـامض DNA من حقيقيات النـواه سيلتحم مع جزيئـات الحامض DNA الفيروسي بواسطة أطرافها اللزجـة (الشكل ١٤-١١).

يمكـن بعد ذلك استخدام انزيـم الليجيز DNA ligase لربط الجزيئين ببعضهما بروابط تسـاهميـة. بعض هذه الجـزيئات الهجين hybrid or recombinant يكون لها نفس مقـدرة الفـيروس البكتيري على إحداث الاصابة في العائل الفيروسي (بكتيريا القولون) ويمكن الكشف عن ذلك بتعريض مزرعة من بكتيريا القولون *E. coli* لخليط من جزيئات الأحماض الهجين DNA ثم استنبات الخلايا في طبق بتري به آجار. تبدأ الخلايا البكتيرية في التكاثر وتكون كساءا رقيقا من الخلايا على سطح الاجار ومع ذلك فان الخلايا التي يكون الحامض DNA الهجين قد نجح في غزوها سوف تقوم بتصنيع الكثـير من النسخ الجديدة من هذا الحامض الهجين قبل ان تموت وتتحلل. تتحرر الجزيئات المعدية وتغزو الخلايا القريبة منها و تتكرر العملية ولا تلبث ان تصبح النتيجة واضحة للعين المجردة على هيئة منطقة دائرية نظيفة أو بقعة في كساء الخلايا (الشكل ١٤-١٢). كل بقعة تمثل مزرعـة نقية "Clone" من جزيئات الحامض DNA ويمكن اكثارها الى مالا نهاية عن طريق عدوى المزيد من خلايا بكتيريا القولون.

على الرغم من ان كل بقعة تنتج مزرعة نقية فريدة من جزيئات الحامض DNA الهجين فان اي قطعة من الحامض DNA من حقيقيات النواه تكون موجودة في البقعة هـي مسألـة صدفـة بحتـة . هضم كل الحـامض DNA الموجود في خلايا كائن من حقيقيات النواة مثل الفأر أو الجرذ بأي أنزيم تقييد ينتج مجموعة بالغة التباين من قطع الحامض DNA وهذه تلتصق بالحـامض DNA من الفيروس البكتيري بطريقة عشوائية تامة. استزراع القطع الممثلة لكل الطراز الجيني لأي كائن يسمى الاستزراع ببندقية الرش "shotgun coning".

المشكلة الآن هي العثور على البقعة (ربما من بين عدة آلاف) التي تحتوي على جين حقيقيات النواة الذي ترغبة. من أجل ذلك تحتاج الى مجـس "probe". دعنا نفترض انك تبحث عن الحامض DNA الذي يحمل شفرة سلاسل الهيموجلوبين في الارنب وكما



الشكل ١٤ - ١٢ . استزراع الحامض DNA الهجين باستخدام الحامض DNA الفيروسى كوسيلة للنقل. ينشطر الحامض DNA الفيروسي بواسطة انزيم تقييد فتنشأ به أطراف لزجة عند كل نهاية من نهايات خيوطه المفردة. يستعمل نفس الانزيم لتحضير عينة من الحامض DNA الغريب (من أحد حقيقيات النواه مثلا). ترتبط قطع الحامض DNA مع بعضها بمساعدة القواعد المتكاملة عند أطرافها اللزجة وانزيم ليجيز الحامض DNA. تخلط جزيئات الحامض DNA الهجين مع خلايا حية من بكتيريا القولون وهي العائل للفيروس البكتيري. الجزيئات الهجينة التي استعادت قدرتها على احداث العدوي تقتل خلايا العائل و تسبب «بقع» في بساط الخلايا غير المصابة. مسح سطح الطبق ينقل بعض الحامض DNA من كل بقعة الى ورقة ترشيح. بعد فصل الحامض DNA الى خيوط مفردة يتم تعريض ورقة الترشيح لحامض RNA مشع يحمل تتابع الجين الذي تأمل في استزراعة. تصوير الاشعاع الذاتي يبين أي البقع تحتوي على هذا الحامض DNA (الشكل ١٤-١٣). البقعة الايجابية الأصلية يتحدد موقعها و يمكن استعمال المزيد منها لعدوى بكتيريا القولون وبهذه الطريقة يمكن انتاج كميات غير محدودة من جين معين في أحد حقيقيات النواه.

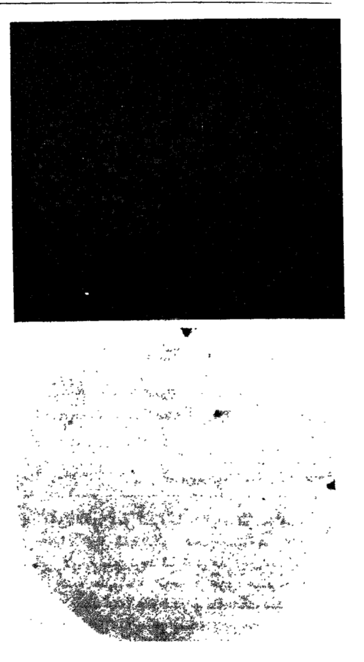
رأينا فانه يمكن عزل الحامض mRNA الخاص بشفرة هذه السلاسل من المواد الاولية في خلايا الدم الحمراء للارنب (الشكل ١٣-٧). يمكن تشعيع هذه الجزيئات بأحد النظائر المشعة ثم استخدامها في البحث عن البقع التي تحتوي على الحامض DNA الذي يحتوي على التتابعات المتكاملة معها اي تتابعات الحامض DNA التي تنسخ منها تتابعات الحامض RNA الخاص بالهيموجلوبين. هذه هي الطريقة. توضع ورقة ترشيح مصنوعة من النيتروسيليلوز برفق على سطح كل طبق آجار يحتوي على بقع. فتمتص ورقة الترشيح بعضا من الحامض DNA من كل بقعة. بعد ذلك يتم تفكيك الحامض DNA الى خيوط مفردة وتنقع ورقة الترشيح في محلول يحتوي على جزيئات الحامض mRNA المشع (الشكل ١٤-١٢). اذا التقي هذا المجس المشع بخيوط متكاملة معه من الحامض DNA فانه يلتحم معها بطريقة واتسون وكريك في ازدواج القواعد. الحامض RNA الذي لم يزدوج يتم غسلة وتوضع ورقة الترشيح على لوحة من فيلم تصوير. أي مساحات تتعرض للاشعاع في هذا الفيلم تمثل البقع التي تحتوي على الحامض DNA الهجين الذي تبحث عنه (الشكل ١٤-١٣).

لأن البقع الاصلية لم يحدث لها تلف بهذه الطريقة فانه يمكن اكثار جزيئات اضافية من هذه العينة بالذات من الحامض DNA الهجين في خلايا اضافية من بكتيريا القولون لانتاج كل ما تريده من نسخ عديدة من هذه العينة.

هنا اذن طريقة (و ان كانت ليست الطريقة الوحيدة) للوصول الى الهدف: الحصول على عينة نقية من جين أحد حقيقيات النواه. قد تبدو لك الطريقة معقدة ولكنها في الواقع مباشرة وتحقق الهدف الذي كان منذ سنوات قليلة يبدو مستحيلا.

١٤-٤ . الجينات المفصولة SPLIT GENES

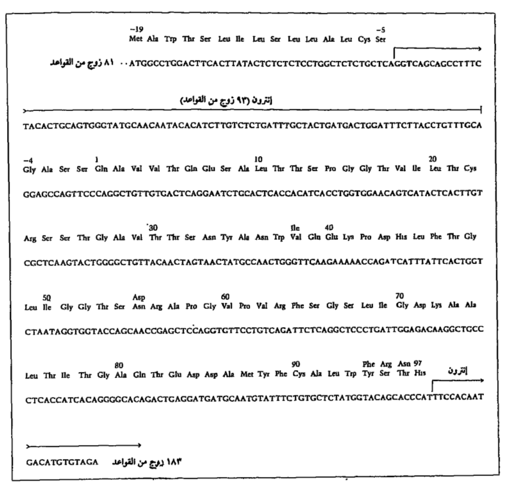
في عام ١٩٧٧ نجح سوزومو تونيجاوا وهو عالم يعمل في بازل بسويسرا في استزراع قطعة من الحامض DNA بالفأر تحمل معلومات الشفرة الخاصة بجزء من سلسلة عديدة الببتيد صغيرة تستعمل في تخليق الاجسام المضادة. هذه السلسلة عديدة الببتيد الصغيرة تسمى السلسلة الخفيفة للجسم المضاد. (وصف تركيب جزيئات الجسم المضاد موجود في الباب ٢٤). بفحص حوالي ٤٠٠٠ بقعة تمكن تونيجاوا من عزل



الشكل ١٤-١٣. أعلى: بقع على بساط من خلايا بكتيريا القولون المصابة. كل بقعة تمثل مكان عدوي بحامض DNA فيروسي قد يحمل تتابعات مطابقة لتتابعات الحامض DNA من أحد حقيقيات النواه. الحامض RNA المشع (مثل الحامض mRNA) يستعمل كمجس للكشف عن البقع التي تحتوي على تتابعات من الحامض DNA يمكن أن يلتحم معها المجس بواسطة ازدواج القواعد على طريقة واتسون وكريك.
أسفل: احدى البقع ارتبط فيها المجس المشع بقوة (المربع الأعلى الأيمن). لاحظ العلامات المميزة على صورة الاشعاع الذاتي والتي تساعد في تحديد أي البقع هي البقعة الموجبة (بتصريح من الدكتور رولاند و. ديفيز).

الفيروس الهجين الذي يحتوي على حوالي ٤٨٠٠ زوج من القواعد في الحامض DNA للفأر التي تحمل شفرة السلسلة الخفيفة والتي تتحد مع الحامض mRNA المجهز من خلايا الفأر المنتجة للاجسام المضادة. تم ارسال ٥ ميلليجرامات من هذه المادة الى جامعة هارفارد لدراسة التتابع فيها بالطريقة الكيميائية لمكسام وجيلبرت.

في خلال شهور تمخض هذا التعاون عن التتابع الدقيق للنيوكليوتيدات في جزء من



الشكـل ١٤-١٤ . جين مفصـول. الجين الذي يحمل شفرة عديد الببتيد الموضح هنا مسبوق ومتبوع و مفصول بقطع من الحامض DNA لا تحمل الشفرة لأي أحماض أمينية. هذه القطع غير الشفرية تسمى انترونات. تتابع الاحماض الأمينية الذي توجد شفرته في هذا الجين وتم استزراعة من جنين الفأر مبين باللون الأسود. هذا التتابع مطابق لما هو موجود في جزيء جسم مضاد معين ما عدا في خمس نقاط من السلسلة (ملونة). يعتقد أن الاختلافات الخمسة نشأت بسبب طفرات حدثت في هذا الجين خلال مراحل تطور الخلية المفرزة للأجسام المضادة.

الحـامض DNA للفـأر يحتـوي على ٧٢٦ زوج من القواعد. النتائج موضحة بصورة تخطيطية في الشكل ١٤ - ١٤. ومن اجل التبسيط سندرس التتابع في الخيط الضد شفـري (´3 - ´5) وان كان التتابع في بعض اجزاء الجزيء قد درس في كلا الخيطين بصورة مستقلة لكي يستخدم كل منهما كاختبار للاخر.

يبـدأ التتـابـع بواحد وثمانين نيوكليوتيدة لاتحمل شفرة لاي بروتين معروف يليها

الكـودون ATG والـذي يحمـل شفـرة الحامض الاميني ميثيونين (Met) الذي يبدا به البروتين. السلاسل الخفيفـة للجسم المضاد مثل كل البروتينات التي يكون مصيرها ان تفرزها الخلية يتم تخليقها بحيث تكون اشارة التتابع الكارهة للماء عند النهاية N. هذا التتـابـع مطلوب لنقل البروتين الى داخل الشبكة الاندوبلا زمية الخشنة PER (انظر القسم ٥-٨) ولكنه يستبعد بعد ذلك. تتابع الاشارة به ١٩ حامض اميني أولها هو الميثيونين Met. ابتـداء من ATG فان النيوكليوتيدات ال ٤٢ التالية تشكل ١٤ كودون تتطابق تماما مع الاحماض الامينية ال ١٤ التالية في تتابع الاشارة ولكن فجأة يتوقف التطابق فبعد الكودون TCA الذي يحمل شفرة السيرين (Ser) فان النيوكليوتيدات الـ ٩٣ التالية لا تتمشى مع أي بروتين في السلسلة الخفيفة أو مع أي بروتين آخر معروف. ومع ذلك فعند نهاية هذه القطعة فان تتابع النيوكليوتيدات يعاود التطابق مرة اخرى مع تتابع الاحماض النووية في السلسلة الخفيفة بادئا بالضبط من حيث انتهى منذ ٩٣ نيوكليوتيدة. وفي الواقع يستمر هذا التطابق لمسافة ٣٠٣ نيوكليوتيدة تحمل الاثنا عشر الاولى منها الشفرة لبقية تتابع الاشارة (أربعة احماض امينية) بينما تحمل البقية الباقية منهـا الشفـرة للأحمـاض الأمينية السبعـة والتسعـون الأولى لهذا النوع من السلاسل الخفيفة بالفأر. القطعة الاخيرة من ٢٠٤ نيوكليوتيدات لاتتطابق مع أي جزء من بقية السلسلة الخفيفة (والتي تحتوي على أكثر من ٢٠٠ حامض اميني).

هنا اذن نمط وراثي مختلف تماما عما هو موجود في الفيروس Ø X 174 (وكذلك عما هو موجود في جميع الجينات البكتيرية). في الفيـروس Ø X 174 وفي البكتيريا فانه بمجرد ان يبدا الجين فانه يستمر حتى يحمل الشفرة لبروتينه كاملا. ولكن الحال ليس كذلك هنا. فالجزء الذي يحمل الشفرة من هذه القطعة الجينية مفصول بقطعتيـن من الحامض DNA لا تحملان شفرة noncoding. مثل هذه الكودونات التي لا تحمل شفرة تسمى التتابعات البينية intervening sequences أو إنترونات introns. الأجزاء التي تحمل شفرة تسمى الإكسونات exons.

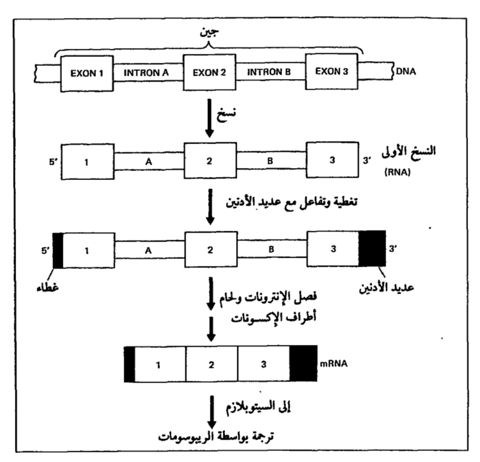
ظهرت كودونات بقية السلسلة الخفيفة للجسم المضاد في قطعة مستزرعة اخرى من حامض DNA للفأر. مرة أخرى احتوت هذه القطع على إكسونات (اثنين) مفصولة عن بعضها ومحاطة بانترونات.

تبـين فيما بعـد ان الجينات المفصولة هي القاعدة في الكائنات حقيقية النواه. في

الـدجاج فان الجين الخـاص بالاوفالبيـومين ovalbumin (البروتين الرئيسي في بياض البيض) يتكون من ثمانية اكسونات مفصولة بسبعة انترونات. جينات الهيموجلوبين أيضـا تكون مفصولة أما الجين الخاص بأحد أنواع الكولاجين collagen فقد إتضح أنه مفصـول الى ٥٢ إكسـون مستقل. وحتى الجينات التي تحمل شفرة للبروتينات اي الجينات الخاصة بتخليق الحامض tRNA والحامض rRNA تكون مفصولة في الكائنات حقيقية النواه. فـي الواقـع الجينـات الوحيـدة فـي حقيقيـات النـواه التـي وجد أنها غير مفصولة هي الجينات الخاصـة بالانترفيرون المضاد للفيروسات antiviral agent interferon (انظر القسم ١٤-٦).

اكتشـاف ان معـظم الجينـات في حقيقيـات النـواه تكـون مفصـولـة حـل لغـزا قديمـا. هذا اللغز هو عدم القدرة على العثور على جزيئات الحامض mRNA في نواه الخلية. تحتوي النواه في الخلية النشيطة على كميات كبيرة من الحامض RNA ولكن هذه الجزيئات (تسمى الحـامض RNA المتبايـن hrRNA أو heterogenous RNA)، تكون اكبر بكثير من جزيئات الحامض mRNA المتصلة بالريبوسومات في السيتوبلازم. اصبح السبب واضحا الان: فالجينات المفصولـة تنسـخ الـى نسـخ اوليـة "primary transcripts" وهـي جزيئـات حامض RNA كبيرة تمثل كلا من الاكسونات والانترونات. قبل ان تعمل هذه الجزيئات كمراسلات عليها ان تمر بعدة خطوات. أولاً لا بد من وضع غطاء "cap" عند النهاية ٥ من الجزيء وذيل "tail" مكون من خيط من قواعد الادنين (poly-A) عند النهاية ٣ (الشكل ١٣-١٥) ثم تفصل القطع المطابقة للانترونات من الجزيء ثم تلتحم النهـايات المقـطوعـة من الاكسـونـات مع بعضهـا. يحدث استئصـال قطع الاكسونات على خطوات وعندما يتم استئصال آخر قطعة إكسوان فان الجزيء الذي اكتمل الان من الحامض mRNA ينقل من النواه الى السيتوبلازم حيث يستطيع أداء عمله.

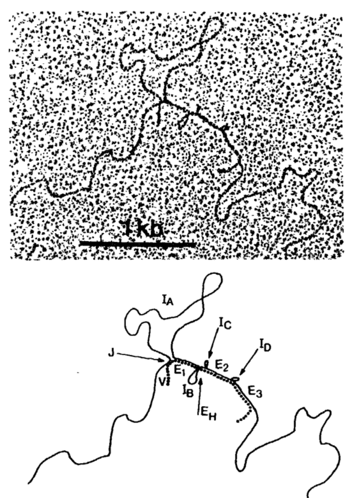
لحظة من التفكـير سوف توضـح ان تقطيع والتحام RNA لابد ان يتم بكل دقة فلو تبقت نيوكليوتيدة واحدة من إنترون أو تم استئصال واحدة من أحد أطراف الاكسونات فان إطـار القراءة من هذه النقطة ومابعدها سوف يتغير. وكما في حالة الجينات المتراكبة في الفيروس Ø X 174 (انظر القسم ١٤-٢) فان الكودونات سوف تحدد تتابع مختلف تماما من الاحماض الامينية من هذه النقطة وحتى نهاية الجزيء. وقد اوضح فحص



الشكل ١٤-١٥ . ترتيب جين مفصول (أعلى) والحامض RNA المنسوخ منه وتحويل هذا المنسوخ الأولى لتكوين جزيء ناضج من الحامض mRNA. الجينات المفصولة شائعة في حقيقيات النواه ولكنها غير معروفة في بدائيات النواه.

تتابع النيوكليوتيدات حول الحدود بين الانترونات في العديد من الجينات المنفصلة عدة تشابهات محددة. فمثلا كل انترون (في الحامض RNA) يبدأ بـ GU وينتهي ب AG. ومن المحتمل ان هذه التتابعات القصيرة تلعب دورا في ارشاد الانزيمات المعنية بعمليات القطع والالتحام.

يتبين وجود الجينات المفصولة بجلاء عند السماح لجزيء ناضج من الحامض mRNA بالالتحام مع الخيط الشفري من الجين الخاص بهذا المراسل. تترابط اكسونات الجين مع التتابعات المتكاملة معها من جزيء الحامض RNA و ذلك يجر الاكسونات الى بعضها البعض ويدفع كل إنترون الى تكوين عروة loop تبرز من الجزيء الهجين (الشكل ١٤-١٦) ويمكن رؤيتها بالمجهر الاليكتروني.



الشكل ١٤-١٦. أعلى: صورة بالمجهر الأليكتروني لجزيء هجين تكون بخلط الحامض mRNA من مزرعة لخلية مفرزة للأجسام المضادة مع خيوط مفردة من الحامض DNA من نفس النوع من الخلايا. الخط السميك يمثل الطول المكافىء لألف قاعدة. الخط المتصل يمثل الحامض DNA و الخط المنقط يمثل الحامض mRNA. كل انترون تمثله عروة (A /, B.. الخ) تفصل بين اكسونات (,E2 .. E1 الخ) تحمل شفرات أجزاء من جزيء الجسم المضاد. طرفي الحامض mRNA يحتويان على تتابعات غير موجودة في الحامض DNA ولذلك لاتلتحم مع الحامض DNA. (عن ماكي وآخرين - عام ١٩٨٠).

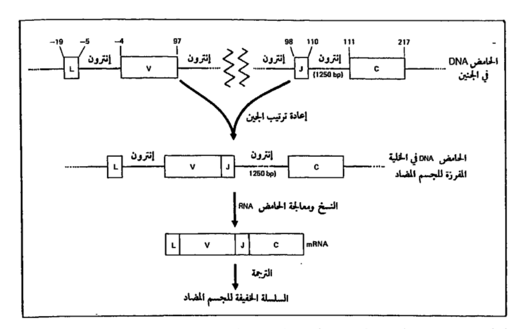
لماذا كان العديد من جينات حقيقيات النواه مفصولا؟ لا احد يعرف على وجه اليقين. هناك بعض الدلائل على انه اثناء عملية التطور تم تجميع العديد من جينات حقيقيات النواه من جينات بدائية صغيرة. ربما كانت الانترونات ببساطة هي البقايا التطورية لاجزاء من جينات لم تعد هناك حاجة اليها. بعض البروتينات (مثل الاجسام المضادة) تترتب في سلسلة من قطع مستقلة أو "domains" لكل منها وظيفة خاصة في الجزيء الكامل. في بعض الحالات على الاقل يتم التشفير لكل من هذه القطع المستقلة بواسطة إكسوان مختلف. بمحاولة استخدام توليفات مختلفة من الاكسونات يستطيع النوع تطوير بروتينات جديدة اسرع بكثير مما لو حاول ذلك بواسطة الطفرة العشوائية.

١٤-٥ . الجينات الوثابة JUMPRING GENES

عرفت من القسم السابق ان السلاسل عديدة الببتيد الخفيفة للاجسام المضادة يتم تشفيرها بواسطة جينان مفصولان - احدهما يحمل شفرة معظم النصف الأول من السلسلة (وهو يعرف بالمنطقة ف V region) - انظر القسم ٢٤-٣-و الاخر يحمل شفرة بقية الجزيء . يوجد كلا من هذين الجينين على قطعة مستقلة من الحامض DNA المستزرع من جين الفأر. لا أحد يعرف بالضبط المسافة بين هذين الجينين على الكروموسومات في الخلايا للفأر ولكن ربما كان الفاصل بينهما هو عشرات الالاف من النيوكليوتيدات .

عندما استزرع تونيجاوا ومعاونوه الحامض DNA من خلايا تخليق الاجسام المضادة وجدوا أن زوج الجينات الخاص بالسلسلة الخفيفة والمفصولان في الحامض بالجنين قد اتصلا ببعضهما البعض. طرف الاكسون الذي يحمل شفرة الاحماض الامينية في الجزء الاول من السلسلة الخفيفة (وحتى الحامض الاميني رقم ٩٧) كان متبوعا بلا انقطاع ببداية الاكسون الصغير الذي يحمل شفرة الاحماض الامينية رقم ٩٨-١١٠ ثم تلا ذلك إنترون من ١٢٥٠ من ازواج القواعد ثم الاكسون الاخير تماما كما كانوا في الحامض DNA بالجنين (الشكل ١٤-١٧) . بعبارة اخرى انه عند مرحلة ما بعد تكوين الجينين فان الموقع الفعلي لاحد هذين الجينين او لكليهما قد تغير. تحرك واحد من الجينين أو كلاهما معا بحيث أصبحا متجاورين بدلاً من أن يشغلا موقعين متباعدين على الكروموسوم . ومن المثير للاهتمام انه عند فحص الحامض DNA من خلية بالغة لا تفرز اجساما مضادة (مثل خلية كبد) وجدت جينات الأجسام المضادة ولكنها كانت مفصولة كما كانت في الجينين. وهذا يوحي بان احدى خطوات تشكل الخلية المفرزة للاجسام المضادة (وتسمى خلية بلازما plasma cell) هي اعادة ترتيب الجينات التي سوف تنشأ عنها سلاسل عديدة الببتيد للاجسام المضادة . في الباب ٢٤ سنرى ان الجينات التي تحمل شفرة السلسلة الكبيرة (الثقيلة) من جزيئات الاجسام المضادة قد تغير مواضعها عدة مرات خلال مراحل تشكل خلية البلازما .

غير معروف حتى الآن ان كانت الجينات الوثابة تلعب دورافي معظم او كل تشكل الخلايا. ومهما كانت الاجابة على ذلك فانه اصبح واضحا اننا لا نستطيع ان نعتبر



الشكل ١٤-١٧ . الجينات الوثابة . الجينان الموجودان في موقعين بعيدين على الكروموسوم في خلية الجنين يصبحان متصلين في الخلية البالغة التي تقوم بتخليق نواتجهما (السلسلة الخفيفة لجزيء جسم مضاد) . ليس معروفا حتى الان مدى انتشار ظاهرة اعادة ترتيب الجينات من الأنواع الاخرى من الخلايا البالغة .

L = الاكسون الذي يحمل شفرة تتابع الاشارة .

J = منطقة الربط في الجين .

V = الاكسون الذي يحمل شفرة معظم المنطقة المتغيرة من السلسلة الخفيفة للجسم المضاد .

C = الاكسون الذي يحمل شفرة المنطقة الثابتة .

الأرقام تعبر عن مكان أول و آخر وحدة حامض أميني يحمل الاكسون شفرته .

الطراز الجيني للخلية بمثابة لوح من الرخام توجد مواصفات الحياة محفورة فيه بطريقة لا تتغير . بالعكس فان التعبير عن الحامض DNA في الخلية هو عملية ديناميكية .

١٤-٦ . التوقعات بالنسبة للهندسة الوراثية THE PROSPECTS OF GENETIC ENGINEERING

أرجو أن يكون واضحا من الاقسام السابقة أن العلم الآن أصبح في وضع يؤهله لدراسة والتعامل مع الجينات بطريقة كانت تبدو مستحيلة منذ عشر سنوات فقط . فالانشطار الدقيق للحامض DNA بواسطة انزيمات التقييد . واستزراع الحامض DNA

الهجين في بدائيات النواه ودراسة التتابع - بل وحتى التخليق النوعي - للجينات قد فتحت احتمالات مثيرة امام استخدام هذه الالات في زيادة رفاهية البشر . وقد تركزت الاحلام والجهود حول نقطتين :

١ ـ حقن جينات حقيقيات النواه في بدائيات النواه (مثل بكتيريا القولون) من اجل تصنيع كميات غير محدودة من بروتين نافع .

٢ ـ حقن جين في خلايا حقيقية النواه ليحل محل وظيفة بها خلل او لاكساب الخلية وظيفة جديدة. حتى الان تم احراز تقدم اكبر في المجال الأول.

استخدام بدائيات النواه لتخليق بروتينات حقيقيات النواه
USING PROKARYOTES TO SYNTHESIZE EUKARYOTIC PROTEINS

كان الهدف من استزراع الحامض DNA الهجين ببساطة هو انتاج نسخ كثيرة من احد جينات حقيقيات النواه. ولكن ماذا لو ان البكتيريا لم تنتج فقط نسخا من هذا الجين بل قامت ايضا بالتعبير عنه اي نسخته وترجمته الى منتج بروتيني؟ العديد من هرمونات الانسان مثل الانسولين insulin هي بروتينات صغيرة أو ببتيدات peptides و الكثير من ضحايا مرض السكر diabetes mellitus يعيشون الان حياة طبيعية بفضل الحقن المنتظم بالانسولين. ويتم تأمين الانسولين من الابقار و الخنازير وبسبب تشابهه الكبير مع انسولين الانسان فانه يؤدي وظيفته في الانسان. ومع ذلك فان هذا الانسولين الحيواني ليس له نفس تركيب انسولين الانسان بالضبط وقد يؤدي استعماله احيانا الى بعض الصعوبات مثل تفاعلات الحساسية. وقد يكون العلاج بانسولين الانسان مرغوبا اكثر ولكنه بدا مستحيلا حتى وقت قريب. يمكن تخليق جزيء الانسولين في المعمل (فهو يحتوي على تتابع دقيق من ٥١ حامض اميني - انظر الشكل ٤-١٧) ولكن بكميات ضئيلة فقط وبتكاليف باهظة. ولكن ماذا لو حقن جين الانسان الخاص بالانسولين في بكتيريا القولون والتعبير عنه؟ من الناحية النظرية يمكن انماء خلايا بكتيريا القولون في أوعية ضخمة vats فتتمخض عن انسولين الانسان الذي يمكن استخلاصه من المزرعة أو من الخلايا.

يبدو ان هذا الحلم قد اصبح وشيك التحقيق. وقد تمت تجربة انسولين الانسان الذي قامت بتخليقة البكتيريا في اناس مصابين بمرض السكر ولكن لابد من ايجاد

حل لعدة مشاكل للوصول الى هذا الهدف. فكما راينا في القسم ١٤-٤ فان جينات حقيقيات النواه تكون مفصولة بينها جينات بدائيات النواه ليست كذلك. بكتيريا القولون من بدائيات النواه وعلى ذلك تنقصها الاليات الانزيمية للتخلص من الانترونات ولحام الاكسونات من اجل تكوين جزيء فعال من الحامض RNA. من حسن الحظ أنه يمكن (و امكن بالفعل) حل المشكلة باستخدام انزيم يسمى الترانسكربتيز العاكسي.

الترانسكربتيز العاكس REVERSE TRANSCRIPTASE

من بين فيروسات الحامض RNA عدد يستطيع غزو خلايا الثدييات والطيور فيجعل هذه الخلايا تصبح خبيثة malignant أي أن هذه الفيروسات المسماه بفيروسات الاورام تسبب السرطان في مجموعة من حيوانات التجارب. الخلية الخبيثة او السرطانية هي تلك التي تنقسم بطريقة متكررة وغير منضبطة فتكون ورم. تعبر الخصائص الخبيثة من الخلية الاولى الى كل ذريتها بنفس الطريقة كأي صفة متوارثة أخرى.

المادة الوراثية لفيروسات الاورام هي الحامض RNA. كيف يمكن للعدوي بهذه الفيروسات ان تؤدي الى اكتساب الخلية المصابة لصفة وراثية ثابتة؟ في محاولة للاجابة على هذا السؤال بحث هوارد تيمين ودافيد بالتيمور عن انزيم في الخلايا المصابة يمكنه تخليق الحامض DNA المتكامل مع الحامض RNA الخاص بالفيروس المسبب للعدوي. وقد وجداه بسرعة. وقد اثبت اكتشاف هذا الانزيم ان المعلومات الوراثية يمكن ان تنساب من الحامض RNA الى الحامض DNA بنفس الطريقة التي درسناها اي من الحامض DNA الى الحامض RNA الى البروتين. وقد سمى هذا الانزيم بالترانسكربتيز العاكس.

اكتشاف الترانسكربتيز العاكس مهد الطريق لتكوين جين تستطيع بكتيريا القولون ان تتعامل معه. اولا يتم تحضير الحامض mRNA الخاص بهذا الجين بصورة نقية ثم يستخدم كقالب لتخليق (بواسطة الترانسكربتيز العاكس) الخيط المتكامل معه من الحامض DNA (وهو يسمى الحامض DNA التكاملي أو cDNA). وهذا بدوره يعمل كقالب لتخليق (بواسطة بوليمريز) الحامض DNA الخيط المتكامل معه (او الضد الشفري) فيتكون حلزون مزدوج كامل. يمكن حقن الجزيء الناتج في بكتيريا

باستخدام الطرق التي وصفناها في القسم ١٤-٣ . وحيث ان هذا الجزيء لا يحتوي على اي انترونات فان البكتيريا تستطيع نسخه وترجمته تماما كما تفعل مع جزيئاتها من الحامض DNA. وكما تتوقع فإنه مازالت هناك بعض المشاكل مثل ايجاد الطرق التي تجعل بكتيريا تعبر بكفاءة عن جين بشرى ولكن هذه المشاكل في طريقها الى الحل سريعا .

العديد من بروتينات الانسان (ولكن ليس الإنسولين) تحتوي ايضا على سلاسل قصيرة من السكر متصلة بها اي انها جلايكوبروتينات . هذا هو الحل مع عامل الانترفيرون المضاد للفيروسات مثلا . جميع الثدييات تنتج الانترفيرون ولكن (على خلاف الانسولين) فان إنترفيرون الانسان فقط هو الذي يعمل في خلايا الانسان . وهناك ادلة متزايدة ان الانترفيرون ليس فقط مضاد قوي للفيروسات ولكنه مفيد ايضا في علاج حالات معينة من السرطان لذلك فان الباحثين والاطباء في جميع انحاء العالم حريصون على تأمين اكبر كمية ممكنة من الانتروفين النقي للانسان . وعلى الرغم من أن بكتيريا القولون تستطيع التعبير عن الجينات البشرية الخاصة بالانترفيرون فانها لا تستطيع لصق مجموعات الكربوهيدرات التي تضعها الخلايا البشرية على الجزيء . من حسن الحظ ان المحاولات المبدئية تشير الى ان الانترفيرون الخالي من المواد الكربوهيدراتية الذي تقوم البكتيريا بتخليقه يمكن ان يعمل بصورة مرضية . من غير المعروف ما اذا كان الحال كذلك بالنسبة للجليكوبروتينات الأخرى ولكنه يبدو غير محتمل . وعلى اي حال فان هناك تطورا سريعا في مجال الهندسة الوراثية فيما يتعلق ببروتينات بشرية اخرى مثل هرمون النمو (انظر القسم ٢٧-٩) وهرمون اخر يسمى سوماتوستاتين somatostatin (أنظر القسم ٢٧-٧) .

ربما يكون إنتاج بعض اللقاحات الجديدة من اوائل النواتج المفيدة لتقنية الحامض DNA. عادة يتم إنتاج اللقاحات المضادة للامراض الفيروسية من فيروسات خامدة inactivated (مثل لقاح الفيروس «المقتول» لشلل الاطفال الذي حضره جوناس سالك) أو من فيروسات تم إضعافها بحيث لم تعد تسبب عدوي خطيرة وان كانت مازالت تكسب المناعة (مثل لقاح شلل الاطفال الذي يؤخذ بالفم والذي طوره البرت سابين) . ولكن كلا من اللقاح الحي أو المقتول لابد ان يتم تحضيره بعناية فائقة للتاكد من أنه لا توجد به أي دقائق فيروسية كاملة النشاط . وقد كان ذلك عيبا خطيراً في تحضير لقاح مأمون ضد التهاب الكبد ب hepatitis B (أو التهاب الكبد المصلى "serum hepatitis") الذي يصيب الانسان وضد مرض الحمى القلاعية

foot-and-mouth disease في الماشية. باستخدام تقنية الحامض DNA الهجين يمكن تصنيع احد البروتينات السطحية للفيروس بكميات غير محدودة واستخدامه في لقاح خال تماما من اي مواد اخرى ضارة (مثل جيناته).

أحاط الجدل بمثل هذه الامثلة من الهندسة الوراثية. ماذا لو أن الحامض DNA من فيروسات مسببة للسرطان أصبح جزءا من التركيب الوراثي لاحد الكائنات التي تعيش في أمعاء الانسان (مثل بكتيريا القولون)؟ ما هو مصير المعركة التي لا تنتهي ضد الامراض المعدية لو ان الجينات الخاصة بمقاومة المضادات الحيوية دخلت إلى الكائنات التي تسبب أمراض للإنسان ؟ أو الجينات الخاصة بانتاج السموم مثل سم الدفتيريا وسم الكوليرا وسم التيتانوس؟ انه الخوف من هروب مثل تلك الكائنات هو الذي أدى الى ذلك الجدل حول ادخال حامض DNA الى البكتيريا.

وضع جينات في حقيقيات النواه PUTTING GENES INTO EUKARYOTES

المجال الثاني الذي تفتحت آفاقه بواسطة التقدم في الهندسة الوراثية هو احتمال حقن جينات فعالة في خلايا حقيقيات النواه. خذ مثلا الفوائد المتوقعة من امكانية حقن الجين الخاص بالسلسلة بيتا في الهيموجلوبين أ في منشئات الخلايا الحمراء لضحية متماثل اللاقحة بالنسبة للانيميا المنجلية. النجاح في هذا المضمار سوف يمكن المريض من تخليق HB^A بالاضافة الى Hb^S وبذلك يكتسب الطراز المظهري المرغوب لمتباين اللاقحة. اوخذ مثلا الفوائد المرجوه من امكان حقن الجينات (من بدائيات النواه - انظر القسم ٤١-٥) الخاصة بتثبيت النتروجين في كائن من حقيقيات النواه مثل الذرة أو القمح أو الأرز إذا إستمرت هذه الجينات في أداء وظائفها فان ذلك من شأنه أن يختزل كمية الاسمدة الكيميائية اللازمة لهذه المحاصيل الحيوية.

لابد من التغلب على عدد من العقبات الجسيمة عند محاولة ادخال معلومات وراثية جديدة إلى خلية حقيقية النواة. أولا لابد أن يكون في مقدورك أن تتعرف على وتعزل المعلومات الوراثية التي تريد استغلالها فقط مع التأكد من أنها لا تشتمل على أي معلومات وراثية دخيلة قد تتسبب في حدوث أضرار. ثانيا لابد من ايجاد وسيلة لادخال هذا الحامض DNA الغريب الى الخلية المتلقية. ثالثا لابد ان تتمكن الخلية المتلقية من تضاعف هذا الحامض DNA الذي اكتسبته بين كل عمليتي انقسام خلوي. رابعا لابد

ان تتمكن الخلية من التعبير عن هذا الجين الجديد اي لابد انها تستطيع ان تنسخ وتترجم هذا الحامض DNA الدخيل.بالنسبة لجينات بدائيات النواه فان ذلك قد يشكل مشكلة خاصة فتماما مثلما ان بدائيات النواه لا تستطيع ان تتناول الجينات المفصولة فانه يبدو ان حقيقيات النواه لا تستطيع ان تتقبل الحامض DNA التكاملي وهو غير مفصول.

تمت محاولات عديدة لحقن جينات في خلايا الثدييات. طريقة تهجين الخلايا الجسدية (وصفها موجود في الباب ١١) تسمح لخلايا احد الانواع بالتعبير عن المعلومات الوراثية من نوع اخر. بالاضافة الى لحام خلايا كاملة مع بعضها فقد تم التوصل الى نتائج مشابهة عن طريق ادخال نواه اجنبية الى الخلية المتلقية (انظر القسم ٥-٣). في الواقع فان خلايا الفأر المعرضة لكروموسومات معزولة من الانسان تستطيع اكتساب ونسخ والتعبير عن جينات الانسان. وقد وجد بعض الباحثين ان الخلايا الثديية النامية في مزارع الانسجة يمكنها ان تمتص حتى الحامض DNA النقي وتدخله في طرازها الجيني. هذا يمثل تحول يوازي تماما التحول التاريخي الذي حققه افري ومساعدوه مع بكتيريا النيوموكوكاي في عام ١٩٤٣. طريقة اخرى تبشر بالنجاح هي تحضير عينة نقية من حامض DNA هجين مسترزع يحتوي على الجين او الجينات المرغوبة وحقن احد هذه الجزيئات في الخلية بواسطة ابرة بالغة الدقة (هذه الطريقة يوجد لها وصف تفصيلي في المقالة التي كتبها اندرسون ودياكوماكوس وموجودة في نهاية هذا الباب).

في اوائل هذا الباب راينا كيف انه يمكن استخدام الفيروس البكتيري في حمل جين معين الى داخل الخلية التي يصيبها. يمكن اتباع أسلوب مشابه مع خلايا الثدييات. تمكن بول برج الحائز على جائزة نوبل من ربط الجين الخاص بالسلسلة بيتا من هيموجلوبين الارنب الى الفيروس SV 40. هذا الفيروس قد حمل معه جين الارنب الى داخل خلايا القرد حيث تم بنجاح تضاعف ونسخ وترجمة الجين الى جزيئات جلوبين الارنب. ولكن معروف أيضا ان الفيروس SV 40 يصيب انواعا اخرى من الخلايا. في الفئران تسبب الاصابة بالفيروس SV 40 حدوث سرطان. ولذلك فان استخدام أحد فيروسات الانسان في ادخال جين مرغوب الى خلايا ضحية بشرية من ضحايا الانيميا المنجلية مثلا يحمل في طياته مخاطر حقيقية.

في جميع هذه الامثلة كانت الخلايا الثديية المتحولة نامية في مزارع انسجة ومع ذلك ففي عام ١٩٨١ نجحت ثلاث مجموعات من الباحثين في ادخال جينات اجنبية الى فئران حية. تم ذلك بحقن حامض DNA يحتوي على الجينات الاجنبية (بما فيها جين لهيموجلوبين الارنب في احدى الحالات وانترفيرون الانسان في حالة اخرى) في البويضات المخصبة للفأر. وعند وضعها في رحم انثى الفأر نمت بعض هذه البويضات بنجاح. وكانت الفئران الوليدة تعبر عن الجينات الاجنبية واستمرت كذلك حتى اكتمل بلوغها. ومن اهم ما حدث انه عند تزاوج هذه الفئران مع فئران عادية فان بعض النسل كان يعبر ايضا عن الجينات الاجنبية. لم يتغير الطراز الوراثي للخلايا الجسدية فحسب ولكن تغير الطراز الوراثي للخلايا التناسلية كذلك.

كيف يمكن لمثل هذه الوسائل ان تفيد ضحايا احد الامراض الوراثية مثل عدم القدرة على تصنيع السلسلة بيتا للهيموجلوبين؟ احد الاحتمالات هو اخذ بعض الخلايا المصابة من المريض وتحويلهم (اي ادخال جينات جيدة اليهم) في مزارع نسيجية ثم إعادتهم الى المريض. ولكن كل طرق التحويل هذه قليلة الكفاءة حيث ان عددا قليلا جدا من الخلايا هو الذي يلتقط الجينات الجديدة. كيف يمكن لهذا العدد القليل جدا من الخلايا ان يزيح الاعداد الكبيرة من الخلايا المصابة الموجودة في المريض ويحل محلها؟ أحد الاساليب هو تحويل خلايا المريض عن طريق اكسابها اثنين من الجينات: جين للصفة المرغوبة (مثل تصنيع السلسلة بيتا للهيموجلوبين) وجين يكسبها مناعة ضد أحد العقاقير المضادة للانقسام غير المباشر antimitotic مثل احد العقاقير المضادة للسرطان. وعندما يسترد المريض هذه الخلايا يعطى في نفس الوقت جرعة صغيرة من هذا العقار وذلك يعطي الخلايا القليلة المتحولة ميزة تنافسية تمكنهم من الاحلال محل الخلايا العديدة غير المتحولة المحيطة بهم. وقد تمت تجربة هذا الاسلوب على بعض الآدميين ولكنه مازال في حاجة الى المزيد من الدراسات لتقدير ما اذا كان صالحا كاسلوب للعلاج.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

توجد الان طرق لعزل جينات مختارة واكثارهم (استزراعهم) وتحديد تتابع النيوكليوتيدات فيهم.

بعض الفيروسات مثل Ø X 174 تستخدم جينات متراكبة وعن طريق زحزحة «إطار القراءة» الذي تتم نسخ ثلاثيات الكودونات به يمكن ايجاد الشفرة الخاصة باجزاء من سلسلة ثانية وربما ثالثة من عديد الببتيد في نفس التتابع من الحامض DNA وبهذا الاسلوب يستطيع الكائن ان يضغط كمية اكبر من المعلومات في كمية محدودة من الحامض DNA.

جينات حقيقيات النواه مثلها مثل جينات بدائيات النواه يمكن استزراعها بحقنهم في قطعة من الحامض DNA تستطيع خلايا عائل بكتيري ان تضاعفها. وتستطيع الفيروسات البكتيرية والبلازميدات القيام بهذه المهمة. التحام الحامض DNA الغريب مع الحامض DNA من الفيروسات البكتيرية او البلازميدات ينتج الحامض DNA الهجين recombinant.

تتكون أغلب جينات حقيقيات النواه من إكسونات - قطع تحمل شفرة لجزء من سلسلة عديد الببتيد - متبادلة مع قطع غير شفرية تسمى إنترونات . والاكسونات تتم ترجمتها الى «نسخ اولية» كبيرة من الحامض RNA. عند معالجة هذا الحامض يتكون الحامض mRNA الناضج والمعالجة تشمل استبعاد القطع التي تمثل الانترونات ثم تلاحم اطراف القطع التي تمثل الاكسونات.

خلال مراحل تكوين الخلية التي يتم إعدادها لتخليق احد الاجسام المضادة فانها تقوم باعادة ترتيب مواضع الجينات التي تحمل شفرة هذا الجسم المضاد. وعلى الرغم من ان هناك امثلة اخرى معروفة لمثل هذه الجينات المتنقلة فانه مازال غير معروف إن كانت هذه الظاهرة تحدث بصفة عامة اثناء مراحل تكوين الخلية في حقيقيات النواة.

توجد الان طرق لغرس جينات اجنبية في حقيقيات وبدائيات النواه على حد سواء وجعل هذه الجينات تتناسخ وتترجم بكفاءة. هذه الطرق لانتاج حامض DNA هجين يتم استغلالها حاليا في تصنيع بروتينات بشرية وغير بشرية ذات قيمة عالية بواسطة البكتيريا والخميرة. كما ان هناك ايضا احتمال ان تساعد هذه الطرق في اصلاح وظائف جينية تالفة في حقيقيات النواه او في اكسابها وظائف جينية جديدة (مثل جعل احد حقيقيات النواه مثل القمح قادرا على تثبيت النتروجين بغرس جينات من بدائيات النواه فيه).

EXERCISES AND PROBLEMS تمارين ومسائل

١ ــ ماهو تتابع الاحماض الامينية الذي يتجمع بواسطة ريبوسوم يقوم بترجمة الرسالة
5´ ↑ G ↑ C ↑ AUGGCGUUUGAAC3´ في اطار القراءة الذي يبدأ
١ ٢ ٣
عند النقطة ١؟ عند نقطة ٢؟ وعند نقطة ٣؟

٢ ــ اكتب بنفس ترتيب تجمعهم تتابع النيوكليوتيدات في جزيء الحامض mRNA الذي يتـم تخليقه من خيط الحامض DNA الذي يحتوي على التتابع
5'CCGATCATCAGTAGC3

٣ ــ كم عـدد القطع من الحامض DNA التي تتكون عند معاملة التركيب
5'..TGGAATTCCGGCCTTA..3'
3'..ACCTTAAGGCCGGAAT..5'
بخليط من انزيمي التقييد Hae III, Eco RI ؟ اكتب تركيب كل قطعة.

REFERENCES المراجع

1. FIDDES, J.C., "The Nucleotide Sequence of a Viral DNA", Scientific American Offprint No. 1374, December, 1977. The story of Q x 174.
2. COHEN, S. N., "The Manipulation of Genes", Scientific American, Offprint No. 1324, July, 1975. One of the pioneers in the cloning of recombinant DNA describes the procedures involved.
3. NOVICK, r.P., "Plasmids", Scientific American, Offprint No. 1486, December, 1980. Plasmids are small, independent DNA molecules in bacteria that can be used for cloning foreign DNA.
4. CHAMBON, P., "Split Genes", Scientific American. Offprint No. 1496, May, 1981.
5. CHOEN, S.N., and J.A. SHAPIO, "Transposable Genetic Elements", Scientific American, Offprint No. 146. February, 1980. Discusses the behaviour of several kinds of jumping genes.
6. TEMIN, H.M., "RNA-Directed DNA Synthesis", Scientific American,

Offprint No. 1239, January, 1972. About reverse transcriptase.

7. GILBERT, W., and LYDIA VIIIA - KOMAROFF, "Useful Proteins from Recombinant Bacteria", Scientific American, Offprint No. 1466, April 1980. A superb account of the various procedures used in the genetic engineering of prokaryotes.
8. ANDERSON, W.F., and ELAINE G. DIACUMAKOS, "Genetic Engineering Mammalian Cells", Scientific American, Offprint No. 1500, July 1981. How cells in tissue culture are transformed by injecting DNA molecules into them.
9. JUDSON, H.F., The Eighth Day of Creation, Simon and Schuster, New York, 1979. A fascinating narrative account of the development of molecular genetics and the scientists who did the work. Includes the story of messenger RNA and the breaking of the genetic code.
10. GROBSTEIN, C., "The Recombinant - DNA Debate", Scientific American, Offprint No. 1362, July, 1977. Besides discussing the political issues, the author gives a clear account of the techniques used, including "shotgun" cloning.



CHAPTER 15 — الباب الخامس عشر

تنظيم التعبير عن الجينات
THE REGULATION OF GENE EXPRESSION



الباب الخامس عشر
تنظيم التعبير عن الجينات

١٥ - ١ . التغير في نشاط الجينات MODULATION OF GENE ACTIVITY

كل الخلايا لديها القدرة على الاستجابة لاشارات معينة تصل اليها من بيئتها . خذ مثلا صديقتنا المألوفة بكتيريا القولون *Escherichia coli*. في داخل الخلية الضئيلة تحتوي بكتريا القولون على المعلومات الوراثية التي تحتاج اليها لأداء وظائف الأيض و النمو والتكاثر. وكما رأينا في الباب ٩ فانه يمكنها تخليق كل ما تحتاج اليه من الجلوكوز وعدد من الأيونات غير العضوية. ولذلك نتوقع أن تحتاج الى عدد كبير من الانزيمات لاتمام هذا العدد الهائل من عمليات التخليق وقد يوجد ٦٠٠ الى ٨٠٠ انزيم في الخلية تحت هذه الظروف. معظم هذه الانزيمات يكون موجودا في كل الاوقات ومع ذلك هناك إنزيمات اخرى لايتم إنتاجها الاعندما تحتاج الخلية اليها فقط. على سبيل المثال عند اضافة الحامض الاميني أرجنين الى المزرعة فإن الخلية تتوقف مباشرة عن انتاج الانزيمات التسعة التي كانت تحتاج اليها من قبل لتخليق الارجنين من مواد وسيطة تنتج أثناء تنفس الجلوكوز. في هذه الحالة إذن فإن وجود نواتج النشاط الانزيمي يكبت تخليق الانزيم.

على العكس من ذلك عند اضافة مادة تفاعل Substrate جديدة الى المزرعة فان ذلك قد يشجع على تكوين انزيمات جديدة تستطيع أيض هذه المادة. فاذا أخذنا مزرعة من بكتريا القولون تتغذى بنشاط على الجلوكوز ونقلناها الى وسط غذائي يحتوي على اللاكتوز تقع سلسلة من أحداث ذات مغزى. في البداية تكون الخلايا هامدة Quiescent: لاتقوم بأيض اللاكتوز وتقل حدة نشاطها الأيضى ويتوقف انقسام الخلايا. ولكن سرعان ماتعود المزرعة الى النمو بنشاط مرة أخرى ويحدث استهلاك

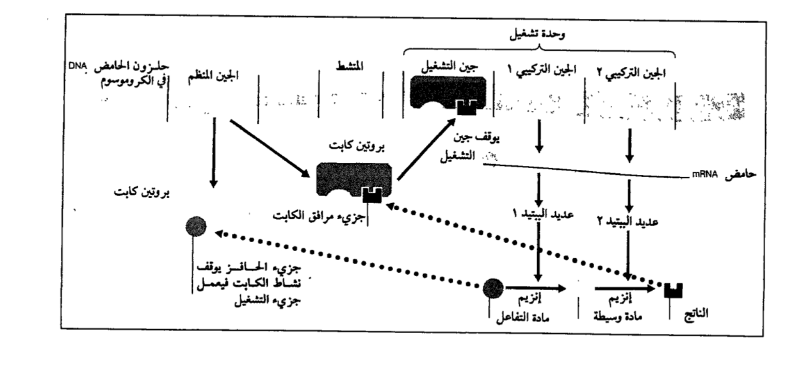
سريع للاكتوز. ماذا حدث؟ أثناء فترة الخمول بدأت الخلايا في انتاج الانزيمات الثلاثة التي لم تكن تنتجها من قبل.

أحد هذه الانزيمات ويسمى البرمييز Permease ينقل اللاكتوز عبر غشاء الخلية من الوسط الغذائي الى داخل الخلية. الإنزيم الثاني ويسمى بيتا جالاكتوسيديز beta - galactosidase يقوم بتميوء اللاكتوز (وهو سكر ثنائي) الى الجلوكوز والجالاكتوز. وبمجرد أن يوجد اللاكتوز ترتفع بسرعة كمية البيتاجالاكتوسيديز في الخلية من الصفر تقريبا الى حوالي ٣٪ من وزن الخلية. (أهمية الانزيم الثالث في أيض الخلية مازالت غير مؤكدة).

مقدرة الخلية على الإستجابة الملائمة لوجود اللاكتوز كانت دائما موجودة. الجينات الخاصة بالأنزيمات الثلاثة هي جزء من الطراز الجيني لكل خلية من خلايا بكتريا القولون. ولكن حتى وقت ظهور اللاكتوز في الوسط الغذائي للمزرعة لم يكن يتم التعبير عن هذه الجينات. سوف نستعمل كلمة التغير modulation لوصف بدء وايقاف التعبير عن المعلومات الوراثية في الخلية كاستجابة للتغيرات التي تحدث في بيئتها.

كل من هذه الانزيمات توجد الشفرة الخاصة به على جين مستقل. يوضح التحليل الوراثي أن هذه الجينات الثلاثة المسماه جينات تركيبية structural genes والتي هي مرتبطة ببعضها وظيفيا تكون في الواقع شديدة الترابط على الكروموسوم البكتيري. ما الذي يجعلها تبدأ عملية انتاج انزيماتها أو بالأحرى ما الذي يمنعها من انتاج الانزيمات قبل ان تنشأ الحاجة اليها؟

جين اخر يسمى الجين المنظم regulator gene هو المسئول عن ذلك. وظيفة الجين المنظم هي انتاج بروتين يمنع الجينات التركيبية الخاصة بالبيتا جالاكتوسيديز.. الخ من أن تعبر عن أنفسها. البروتين المنظم الذي يسم بالكابت repressor لايفقد الجينات التركيبية نشاطها مباشرة ولكنه يكبت جين صغير (طوله ٢٧ من أزواج القواعد فقط) مجاور لهم مباشرة ويسمى جين التشغيل operator (الشكل ١٥-١). مجموع جين التشغيل و الجينات التركيبية المرافقة له يسمى وحدة التشغيل operon. وربما كان دور جين التشغيل عندما لايكون مكبوتا بالمنظم هو فصل خيطي الجزء من الحامض DNA الذي يحتوي على الجينات التركيبية الثلاثة حتى يمكن نسخ أحد الخيطين بواسطة.



الشكل ١٥-١ . افتراض جاكوب ومونود للتحكم الجيني في حقيقيات النواه. عندما يكون جزيء الحافز موجودا لا يستطيع الكابت أن يتصل بجين التشغيل وهكذا يستمر النسخ والترجمة كالمعتاد وعندما يكون جزيء مرافق الكابت موجودا تغلق وحدة التشغيل (ملونة). المنشط هو موضع التحام بوليميريز الحامض RNA.

انزيم بوليميريز الحامض RNA الى جزيء مفرد من الحامض mRNA وتقوم الريبوسومات المرتحلة على هذا الجزيء بترجمة الرسائل الى عديدات الببتيد التي تتركب منها الانزيمات الثلاثة . (تستطيع أن ترى لماذا كانت كودونات التوقف UAA أو UAG أو UGA مطلوبة لانهاء تخليق عديدات الببتيد بين أجزاء الحامض mRNA الذي يحمل الشفرة الخاصة بالإنزيمات الثلاثة) .

ما الذي يحدد اذن ان كانت المادة الكابتة التي ينتجها الجين المنظم فعالة؟ في الحالة التي وصفناها فان وجود اللاكتوز في حد ذاته هو الذي يمنع الكابت من ممارسة تأثيرة على جين التشغيل. يتحد اللاكتوز مع الكابت وهو بروتين وكنتيجة لذلك قد يتغير شكل البروتين بدرجة كافية تجعله غير قادر على الإتحاد مع جين التشغيل ومن ثم فقده لنشاطه. وبذلك يمكن أن يبدأ تخليق البيتاجالاكتوسيديز والإنزيمين الاخرين.

الالية التي وصفناها هنا توصل اليها العالمان الفرنسيان فرانسوا جاكوب وجاك مونود لتفسير وراثة النشاط الانزيمي وقد نالا عنها جائزة نوبل في عام ١٩٦٥ .

كما رأينا فان نشاط بعض الجينات يمكن كبته. الجينات التسعة المعنية بانتاج إنزيمات تخليق الأرجنين وجدت متجمعة في ست وحدات تشغيل منفصلة ومع ذلك فان جين منظم واحد يستجيب لوجود الأرجنين ويكبت كل وحدات التشغيل الست ومن المحتمل أن الجين المنظم ينتج كابت يعطل كل وحدات التشغيل الست حينما يكون الكابت متحدا مع الأرجنين أي مرافقه الكبتي corepressor (الشكل ١٥-١). فائدة هذه الالية للخلية واضحة. فوجود مادة أيضية أساسية يوقف تخليق الانزيمات الخاصة بتصنيع هذه المادة نفسها وبذلك يمتنع تخليق بروتينات غير لازمة في الخلية.

وكما يبدو من الاسم فان الكابت ليس إلا اليه سلبيه للتحكم. وقد ثبت حديثا أن بعض عمليات نسخ الجينات تقع أيضا تحت تحكم ايجابي. فقد شاهدنا أن الفيروس البكتيري الذي يغزو خلية يستحوذ على الكثير من النشاط الايضي للخلية العائلة له ويستخدمه في انتاج صور عديد من نفسه. عندما تبدأ بكتيريا القولون في نسخ وترجمة جينات أحد الفيروسات البكتيرية التي تصيبها (ويسمى T4) فان واحدا من أوائل البروتينات الفيروسية التي يتم تخليقها يتحد مع انزيم بوليميريز الحامض RNA الخاص

بالبكتيريا وبذلك يختزل هذا البروتين الفيروسي كفاءة بوليميريز الحامض RNA في نسخ جينات العائل ويرفع كثيرا من كفاءته في نسخ جينات فيروسية أخرى.

الكثير من البكتيريا (ليس من بينها بكتيريا القولون) تكون جراثيم كامنة عندما تأخذ الظروف البيئية في التدهور وهذا يتضمن التعبير عن جينات لم تكن فعالــة . ومن المثيــر للأهتمام فان التركيب الجزيئي لبوليميريز الحامض RNA البكتيري يتغير في هذا الوقت وتكون النتيجة أنه يحول نشاطه في النسخ من الجينات المتعلقة بالنمو الخضري الى أولئك المسئولين عن تكوين الجراثيم.

هنــا اذن آليتــان إحدهما سلبية والاخرى إيجابيه يتغير بهما التعبير عن المعلومات الوراثية في الخلية البكتيرية. كل منهما تعمل عن طريق تنظيم (كبت أو تشجيع) النسخ الأنتخابي selective transcription للجينات الى جزيئات الحامض mRNA.

١٥-٢ . التغير في حقيقيات النواه MODULATION IN EUKARYOTES

ماذا عن حقيقيات النواة؟ هل يستعملون أجهزة لتنظيم النسخ تشبه تلك الموجودة في بدائيات النواه؟ من المؤكد ان خلايا حقيقيات النواه تمارس التغير modulation. خذ مثلا خلايا البويضات في الانسان. فقبل أن يولد الجنين المؤنث بعده شهور يحجز في مبايضه الخلايا المنشئة لكل البويضات التي ستتكون بالأنثى طوال حياتها. لمدة إثنتى عشرة سنة أو نحو ذلك تظل هذه الخلايا المسماه بخلايا البويضات صغيرة وخاملة ومتجمدة عند منتصف الإنقســام الإختــزالي الأول. وعنــد بلــوغ سن الحلــم puberty تبدأ خلايا البويضات (عادة واحدة كل شهر) مرحلة من النمو والتطور السريع جدا وتشمل إتمام الإنقســام الإختــزالي الأول وبداية الثاني. هذه التغيرات الكبيرة تفجرها المستويات المتصــاعــدة للهرمونات في الدم. بدون هذا الحافز من الهرمونات لن تبلغ المنشئات الضئيلة للبويضات مرحلة النضج أبدا.

هنا اذن مثال في خلية حقيقية النواه على التغير في نشاط الجينات: التعبير الجديد عن معلومات وراثية موجودة من قبل إستجابة لاشارات بيئية متغيرة. وهي تدلنا على أنه كما في حالة بكتيريا القولون فان خلايا حقيقيات النواه تحتوي على معلومات وراثية أكثر مما تستعمله في أي وقت من الأوقات. ولكن بأي آليات يمكنها تحقيق مثل ذلك

النشاط الجيني الإنتخابي؟

على الرغم من أن الضوابط النسخية توجد في حقيقيات النواه بلاشك الا أن الدليل على وجود بروتينات الكبت وجينات التشغيل مازال ضعيفا. وجدت جينات تؤثر على التعبير عن جينات أخرى في حقيقيات النواه مثل الفطريات والذرة والفئران ولكن آلية ممارستها لهذا التأثير مازالت غير معروفة.

ربما كان من الحمق أن نتوقع وجود ضوابط نسخية في حقيقيات النواه من نفس النوع الموجود في بدائيات النواه. فهاتين المجموعتين المتباعدتين من الكائنات تختلفان كثيرا في طريقة التعبير عن المعلومات الوراثية. حقيقيات النواه (كما يدل الاسم) بها نواه وهي التي يتم فيها نسخ الجينات أما تخليق البروتينات (أي الترجمة) فانه يحدث في السيتوبلازوم. في بدائيات النواه يحدث النسخ والترجمة في نفس الوقت (ارجع الى الشكل ١٣-١٢). في حقيقيات النواه يحدث انتاج الحامض mRNA ثم يتبعة انتقال هذا المراسل الى السيتوبلازم قبل أن تبدأ الترجمة.

تميل المراسلات في بدائيات النواه الى أن تكون غير مستقرة. فبعدة العمل كقوالب في عدد من جولات الترجمة فانها تتحلل وما لم يحل محلها نسخ جديدة فان تخليق البروتينات سرعان ما يتوقف. وعلى ذلك فان الضوابط النسخية تنعكس بسرعة في مستوي الترجمة لبروتين معين. وعلى النقيض من ذلك فان المراسلات في حقيقيات النواه قد تكون مستقرة تماما. ففي الخلية البيضية سريعة النمو مثلا تتكون المراسلات الامية ولكنها لن تترجم إلابعد عدة أيام من تكوينها واذا كان قد حدث بها اخصاب فقط.

التغير في خلية البيضة النامية يحدث بسبب التعرض لمستويات متزايدة من الهرمونات الجنسية. هذا المثال للتغير بسبب اشارات هرمونية ليس الا واحدا من أمثلة كثيرة. ففي كل من الحيوانات والنباتات تعمل الهرمونات بقوة على تغير التعبير عن الجينات. ويبدو الان أن بعض تأثيرات الهرمونات على الأقل تعود الى تأثيرهم على نسخ الجينات.

واحد من أكثر أنظمة التغير الهرموني دراسة وتحليلا هو نظام الهرمونات الجنسية الأنثوية وهي الإستروجينات estrogens و البروجيسترون progesterone.

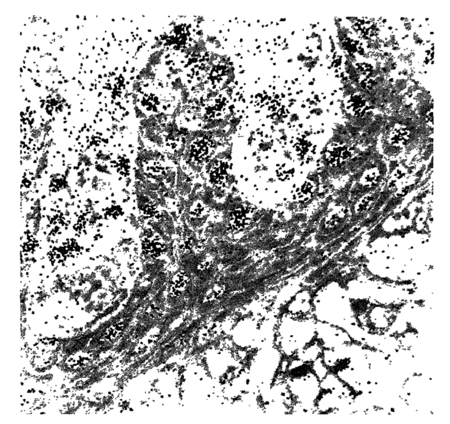
الاستروجينات والبروجيستيرون كلاهما من الستيرويدات (أنظر القسم

٤-٢). من أكثر الأنسجة تأثرا بالإستروجينات هو بطانة الرحم المسماه بطلائية الرحم endometrium. عند تعرضها للإستروجينات يزداد سمكها (إستعداد لحدوث الحمل) وتنشط خلاياها أولا في تخليق RNA ثم في تخليق البروتينات. هذه الاستجابة التي تستغرق عدة أيام لكى تحدث تتضمن بلا شك نشاطا جينيا جديدا أو على الأقل متزايد. يمكن إعاقة التأثير التنشيطي للإستروجينات على هذه الخلايا بواسطة مضاد حيوي يسمى أكتينومايسين د actinomycin D.

يمارس الأكتينومايسين (د) تأثيره على الخلايا بطريقة بالغة الدقة فهو يلتحم مع الحامض DNA في الأنوية ويمنع انفصال خيطي هذا الحامض وبذلك لايستطيع جزيء الحامض DNA أن يعمل كقالب لتخليق جزيئات إضافية من الحامض DNA أولتخليق جزيئات الحامض RNA. بدون مدد متجدد من الحامض RNA فان تخليق البروتينات في الخلية سرعان ما يتوقف. وبذلك توحى اعاقة الاكتينومايسين د لاستجابة خلايا طلائية الرحم لتأثير الإستروجينات بأن الإستروجينات تعمل كمغيرات لنسخ الجينات.

يدعم هذا الإستنتاج ما وجد من أن الإستروجينات تتراكم في أنوية خلايا طلائية الرحم. في الواقع فانه خلال ١٥ دقيقة من إعطاء إستروجينات مشعة (أو بروجيستيرون - الشكل ١٥-٢) الى حيوانات التجارب مثل فئران التجارب (خنازير غينيا) أو الفئران فان النشاط الإشعاعي يظهر في أنوية خلايا طلائية الرحم وهذا يحدث أسرع كثيرا من أي زيادة ملحوظة في تخليق الحامض RNA أو البروتين في هذه الخلايا. بالاضافة الى ذلك فان تراكم الاستروجينات لا يحدث في كل انواع الخلايا. فخلايا الكبد والدم مثلا لاتتراكم الهرمونات في أنويتها. الخلايا المستهدفة "target" cells فقط مثل خلايا طلائية الرحم هي التي تتراكم فيها الهرمونات وهذه الخلايا فقط هي التي يتغير نشاطها بهذه الهرمونات.

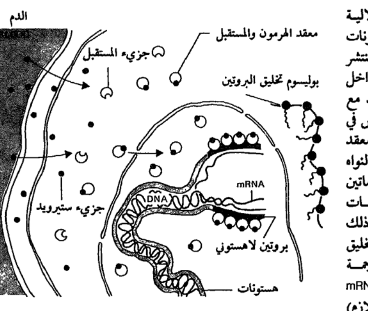
ما هي آلية حدوث ذلك؟ الإستروجينات مثل كل الستيرويدات هي جزيئات صغيرة كارهة للماء ولذلك فهي تنتشر بسهولة خلال أغشية الخلايا - كل أغشية الخلايا ونتوقع أن تكون كل خلية في الجسم معرضة لهم عند إنتقالهم مع الدم. وفي الحقيقة تنتشر الإستروجينات بحرية الى داخل كل الخلايا. ومع ذلك فانها تنتشر بنفس الحرية الى خارج الخلايا ماعدا خلايا الأعضاء المستهدفة. في الخلايا المستهدفة (مثل طلائية



الشكل ١٥-٢ . صورة الاشعاع الذاتي لخلايا طلائية الرحم من خنزير غينيا مأخوذة من الحيوان بعد ١٥ دقيقة من حقنه بالبروجيستيرون المشع . تركز النشاط الاشعاعي في أنوية خلايا طلائية الرحم (كما يتضح من الحبوب الداكنة الموجودة في الأنوية) . يمكن مشاهدة نفس التأثير عند المعاملة بالاستروجينات المشعة . الخلايا غير المستهدفة لا يوجد بها هذا التراكم للهرمونات الجنسية الانثوية (بتصريح من مادابانادا سار ووالتر اي. ستمف) .

الرحم) فانها ترتبط بقوة مع أحد بروتينات السيتوبلازم ويسمى المستقبل receptor. بعد ذلك يهاجر معقد المستقبل والهرمون الى داخل النواه (الشكل ١٥-٣) حيث يتحد هذا المعقد مع كروماتين chromatin النواة .

يحث وصول هذا المعقد تخليق الحامض RNA بغزاره (مالم يكن هذا التخليق قد أعيق بالاكتينومايسين د) . تحليل الحامض RNA يكشف عن أنه يشتمل على المراسلات الخاصة ببروتينات معينة سوف يتم تخليقها كنتيجة للمؤثرات الهرمونية . إذا ما أخذنا مثلا آخر أحسنت دراسته وهو تعريض خلايا قناة المبيض في الدجاج الى السترويد المسمى بروجيسترون فاننا نجد ان الخلايا تبدأ مباشرة بتخليق كميات كبيرة



الشكل ١٥-٣. الالية المقترحة لفعل الهرمونات السيترويدية. تنتشر جزيئات الهرمون الى داخل الخلية حيث تتحد مع جزيئات مستقبل خاص في السيتوبلازم. يتحرك معقد الهرمون والمستقبل الى النواه حيث يتحد مع الكروماتين ربما بواسطة بروتينات لاهستونية خاصة. يلي ذلك عملية النسخ أي تخليق الحامض mRNA. ترجمة جزيئات الحامض mRNA (التي تحدث في السيتوبلازم) تنتج بروتينات تؤدي وظيفة (أو وظائف) هذه الخلية المستهدفة والتي ينشطها الهرمون.

من البروتين المسمى أوفالبيومين ovalbumin (المكون الأساسي في بياض البيض). أولا تظهر في الخلية جزيئات الحامض mRNA الذي يحمل شفرة الأوفالبيومين. وعلى مدى ساعات قليلة يرتفع عدد جزيئات المراسلات الخاصة بالأوفالبيومين من الصفر تقريبا الى ١٠ آلاف لكل خلية. في هذه الحالة فقد قام معقد المستقبل والهرمون بتشغيل جين الأوفالبيومين مما يؤدي الى نسخه الى الحامض mRNA.

كيف يحث البروجيسترون نشاط جينات معينة (مثل الأوفالبيومين) دون غيرها؟ بعبارة أخرى بأي آلية يفجر النشاط الجيني التفاضلي؟ إجابة مبدئية فقط هي المتاحة حتى الان. يتحد معقد البروجيستيرون والمستقبل مع مجموعة معينة من البروتينات اللاهستونية nonhistone تكون موجودة في الخلايا المستهدفة (قناه المبيض).

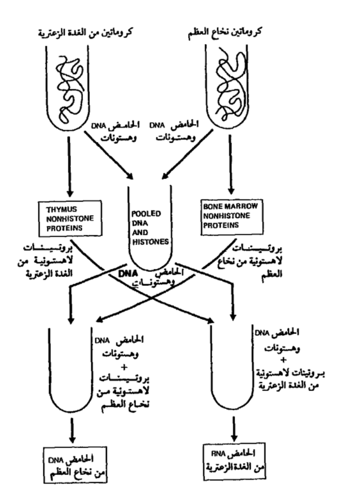
قد تتذكر أن الكروماتين يحتوي (بالاضافة الى الحامض DNA) على خمسة أنواع من الهستونات (الشكل ١٥-٤) والعديد من أنواع البروتينات اللاهستونية. الهستونات متشابهة جدا من نسيج الى آخر وحتى من نوع الى آخر. في الواقع فان أحد الهستونات الموجودة في خلايا العجل يختلف عن هستون مشابه في خلايا البسلة عند موضعين فقط (أي حامضين أمينيين) من مجموع ١٠٢ حامض أميني في الجزيء. يحتوي الكروماتين

كذلك على مجموعة اللاهستونات وهي غير متجانسة الى حد بعيد (الشكل ١٥-٤). بالاضافة الى ذلك فان محتوي الخلية من اللاهستونات يختلف من خلية إلى أخرى. ويتحد معقد البروجيستيرون والمستقبل مع واحد أو أكثر من هذه البروتينات اللاهستونية - التي تنفرد بها الخلايا المستهدفة في قناة المبيض. وعندما يحدث ذلك تصبح هناك مواضع متاحة لإرتباط بوليمريز الحامض RNA ويبدأ نسخ الأوفالبيومين وجينات مناسبة أخرى.

كما ترى في الشكل ١٥-٤ فان البروتينات اللاهستونية في خلية ما تكون شديدة التباين. بعض الجزيئات في هذه المجموعة غير المتجانسة تبدو فريدة بالنسبة للخلية التي توجد بها. دعنا ندرس الان تجربة أخرى تكشف عن أهمية البروتينات اللاهستونية في تحديد أي الجينات تكون نشيطة في الخلية.

الشكل ١٥-٤. لوحات الحمل الكهربي للبروتينات الهستونية واللاهستونية المعزولة من الكروماتين. هناك خمسة أنواع من الهستونات (الى اليسار) وهي تختلف قليلا من نوع الى نوع من الخلايا أو حتى من نوع الى نوع من الكائنات. هناك أنواع عديدة من البروتينات اللاهستونية (الى اليمين) تتراوح في الوزن ما بين ١٠٠٠٠ الى ١٥٠٠٠٠ دالتون. تختلف أنواع البروتينات اللاهستونية من نوع خلية الى آخر ومن نوع الى آخر من الكائنات. التباين الكبير في البروتينات اللاهستونية يجعل منها مواد أفضل لأداء وظائف تنظيمية داخل الخلايا. (بتصريح من جاري س. ستين وجانيت سواينهارت ستين بجامعة فلوريدا).

مكوناته : الحامض DNA و الهستونات والبروتينات اللاهستونية. عند إعادة خلط هذه المواد في أنبوبة إختبار في وجود بوليمريز الحامض RNA و النيوكليوتيدات اللازمة فان تخليق الحامض mRNA المميز للنسيج الذي أتوا منه يبدأ. ومع ذلك فان البروتينات اللاهستونية هي التي سوف تحدد أي الجينات سيتم نسخه. فعند خلط الحامض DNA والهستونات المستخلصة من نخاع عظام الأرنب مع خلايا الغدة الزعترية (التيموسية) thymus للأرنب فان الخليط يستطيع تخليق الحامض mRNA المميز لأي من النسيجين على حسب مصدر البروتينات اللاهستونية التي تضاف إليه. وعلى ذلك فانه عند إضافة بروتينات لاهستونية من خلايا نخاع العظم الى الخليط فان الحامض mRNA الناتج يكون مثل ذلك الموجود في خلايا نخاع العظم. بينما اذا أضيفت بروتينات لاهستونية من خلايا الغدة الزعترية بدلا من ذلك فان جزيئات الحامض mRNA الناتجة تكون مثلها في خلايا الغدة الزعترية (الشكل ١٥-٥). هذه النتائج تقدم دليلا إضافيا على



الشكل ١٥-٥. الدليل على أن البروتينات اللاهستونية تحدد أي الجينات (DNA) يتم نسخها الى الحامض RNA. عند خلط الحامض DNA والهستونات من نخاع العظم ومن خلايا الغدة الزعترية للأرنب فانها وجهت تخليق الحامض RNA المميز لمصدر البروتينات اللاهستونية المضافة الى الخليط. قام بهذه التجارب بول جيلمور و ر. س جيلمور.

أهمية البروتينات اللاهستونية في تشغيل الجينات المناسبة لنوع معين من الخلايا كاملة التشكل.

١٥-٣. الجينات العملاقة والنشاط التفاضلي للجينات GIANT CHROMOSOMES AND DIFFERENTIAL GENE ACTIVITY

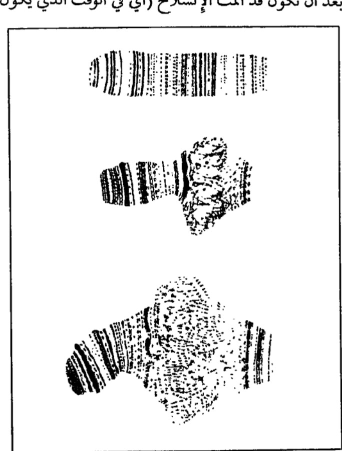
تحتوي بعض الخلايا في يرقات حشرات معينة على كروموسومات عملاقة. في الباب ١١ لاحظنا وجود كروموسومات عملاقة في خلايا الغدد اللعابية لذبابة الفاكهة *Drosophila*. الكروموسومات العملاقة هي كروموسومات الطور البيني وهي أكثر استطالة من كروموسومات الطور الإنفصالي. السبب في أنها مرئية أثناء الطور البيني عندما لاتكون الكروموسومات العادية غير مرئية هي أنها نواتج التضاعف الكروموسومي المتكرر غير المصحوب بانقسام خلوي. تصطف ثنائيات الكروموسومات الأمية والأبوية بجانب بعضها البعض في تناسق كامل على كل طولها وتكون النتيجة أشبه بالسلك متعدد الخيوط. في الغدد اللعابية لذبابة الفاكهة يكون كل كروموسوم عملاق نتيجة لتسع دورات من التضاعف. وعلى ذلك يكون هناك أكثر من ألف خيط في السلك. الكروموسومات العملاقة لبعض الحشرات بها ١٦ ألف خيط.

تتكون الكروموسومات العملاقة من تتابع خطى من أشرطة قاتمة متبادلة مع أشرطة بينية باهتة (الشكل ١١-٣). يكون معظم الحامض DNA في الأشرطة. ففي العديد من الحالات يمكن نسبة موقع جيني محدد الى شريط محدد وقد يظهر في الواقع أن كل شريط يحتوي على موقع جيني واحد. هناك أكثر من ٥ آلاف شريط في الكروموسومات العملاقة لذبابة الفاكهة وهذه قد تمثل كل ما بالكائن من جينات. وعلى أي حال فان تتابع الجينات والمسافات النسبية بينهم (أنظر القسم ١١-٦) تقترب كثيرا من المواضع النسبية لتلك الأشرطة التي أمكن التعرف عليها كمواقع جينية محددة.

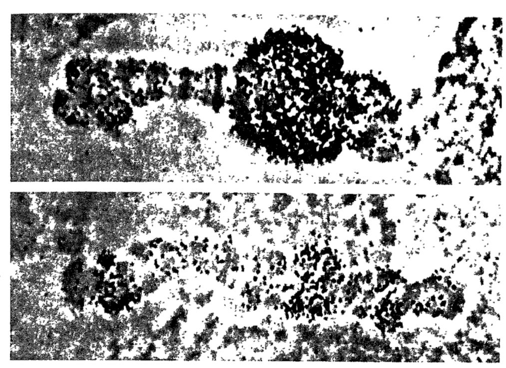
يختلف قطر الكروموسوم العملاق من مكان الى مكان. ففي بعض المواضع التي تسمى إنتفاخات "puffs" قد يبدو الكروموسوم متورما بوضوح (الشكل ١٥-٦) عند امداد الخلية باليوريدين المشع (U - وهو النيوكليوتيد الذي ينفرد به الحامض RNA) يمكن اثبات أن هذه الإنتفاخات هي أماكن التخليق المركز للحامض RNA (الشكل ١٥-٧). وعلى ذلك اذا كانت الأشرطة تمثل جينات فإنه يبدو أن الأشرطة المنتفخة تمثل

جينات يجري نسخها.

الكروموسومات العملاقة في خلايا أحد الأنسجة (مثل الغدد اللعابية لذبابة الفاكهة) لها نفس المظهر العام لتلك الموجودة في نسيج آخر (مثل أنابيب ملبيجي في ذبابة الفاكهة). ولكن مكان الإنتفاخات يختلف من أحد أنواع الخلايا الى آخر وهذا يعني أن الجينات النشيطة في أحد أنواع الخلايا تختلف عن تلك الموجودة في الأنواع الآخرى. وماذا يمكن أن يكون أكثر ملاءمة من ذلك؟ أكثر من ذلك فحتى في النوع الواحد من الخلايا فان نمط الإنتفاخات يختلف من وقت لاخر. فمثلا كلما بدأت يرقة الحشرة في الإستعداد للإنسلاخ فان تتابع محدد من الإنتفاخات يحدث في كروموسوماتها ويمكن التنبوء به. ويبدأ الإنسلاخ في الحشرات بمستويات متصاعدة من هرمون يسمى إكدايسون ecdysone. والإكدايسون (مثل البورجسترون والإيستروجينات) هو ستيرويد. اذا حقن الإكدايسون في يرقة ذبابة الهاموش *Chironomus* الضئيلة مباشرة بعد أن تكون قد أتمت الإنسلاخ (أي في الوقت الذي يكون معدل الإكدايسون الذاتي



الشكل ١٥-٦. جزء من كروموسوم عملاق ليست به انتفاخات (أعلى) وبه انتفاخات (وسط و أسفل). بتصرف عن برويـر وبافان: كروموسوما - العدد ٧ - صفحات ٣٧١ - ٣٨٦ - سنة ١٩٥٥.



الشكل ١٥-٧. أعلى: صورة الاشعاع الذاتي لانتفاخ على الكروموسم الرابع في ذبابة الحشرة. بعد معالجتها بالاكداسيون واليوريدين المشع. الحبوب المتجمعة عند الانتفاخ تبين أنه مكان للتخليق الكثيف للحامض RNA.
أسفل : عندما يوجد الأكتينومايسين د كذلك يمتنع الانتفاخ ويقل تخليق الحامض mRNA.
(بتصريح من كلاوس بيللنج-معهد ماكس بلانك لعلوم الحياه توبنجن).

فيها منخفض جدا) فان تتابع إنتفاخات ما قبل الإنسلاخ يعود مرة أخرى. يظهر أول إنتفاخ في خلال ٣٠ دقيقة ويتبعة الاخرون بلا هوادة خلال الساعات القليلة التالية (الشكل ١٥-٨). يبدو أن وجود الإكدايسون قد عمل على تشغيل سلسلة من الجينات. وفي الواقع تم إستخلاص حامض mRNA من هذه الخلايا المعاملة بالإكدايسون كان يعمل كقالب لتخليق إنزيم غير موجود في خلايا اليرقات التي لم تعامل بهذا الهرمون.

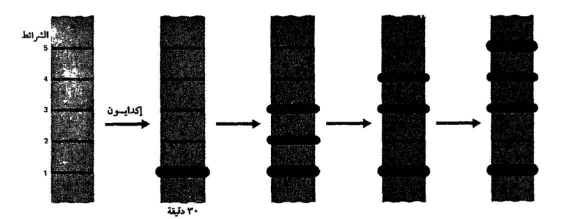
يتوقف انتاج الإنتفاخات بعد الحقن بالإكدايسون عند إعطاء الأكتينومايسين د في نفس الوقت وهذا يشكل دليلا إضافيا على أن الهرمون يؤدي عمله عن طريق إفساح المجال أمام المعلومات الوراثية في الخلية.

الدليل يكون مباشرا لو أمكن الربط بين وجود إنتفاخ معين ووجود

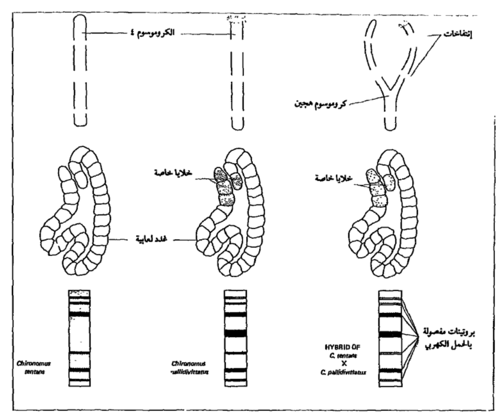
منتج جيني معين. من بين أنواع جنس الهاموش *Chironomus* يوجد نوعان تختلف خلايا الغدد اللعابية فيهما بصورة قاطعة. ينتج أحدهما (*C.pallidivittatus*) حبيبات خاصة في بعض خلايا غدده اللعابية بينما لاينتج الاخر (*C.tentans*) هذه الحبيبات. بالاضافة الى ذلك فان النوع الأول به إنتفاخ زائد في كروموسومات هذه الخلايا عما في النوع الثاني (الشكل ١٥-٩). وقد أوضح التهجين بين النوعين أن هاتين الصفتين يتم توارثهما كصفات وحيدة الجينات وتبين من الخرائط الكروموسومية (أنظر القسم ١١-٦) أن الجين يوجد على الكروموسوم عند نقطة الإنتفاخ الذي ورثه أحد النوعين عن النوع الاخر. الجينات تحمل الشفرة الخاصة بالبروتينات ونتوقع أن يحتوي النوع *C. pallidivittatus* في خلايا غدده اللعابية على بروتين لايوجد في النوع *C. tentans*. فصل البروتينات التي تنتجها هذه الخلايا كشف عن ٦ بروتينات مشتركة بين النوعين وواحد موجود فقط في النوع *C. pallidivittatus* (الشكل ١٥-٩). هنا إذن دليل قوي على أن الموقع الجيني ينتج إنتفاخا واحدا يخلق الحامض RNA ينحدر منه بروتين فريد وصفة (الحبيبات) مرئية فريدة في الخلية.

١٥-٤. ضوابط الترجمة TRANSLATION CONTROLS

آليات النشاط الجيني التفاضلي التي درسناها حتى الان تعني كلها بتنظيم معدل نسخ الجينات. في بدائيات النواه قد تكون هذه هي كل القصة وفي حقيقيات النواه قد



الشكل ١٥-٨. حث الاكديسون لتكوين نمط معين ومتتابع من الانتفاخات ربما كان المنتج (أو المنتجات) الجينية عند انتفاخات معينة (عند الشريط ١ مثلا) يعمل على تشغيل شرائط أخرى (وايقاف بعض الشرائط مثل رقم ٢ في المرحلتين الاخيرتين).



الشكل ١٥-٩. التلازم بين وجود انتفاخ معين (ملون) وتكوين الحبيبات في الخلايا الخاصة وتخليق بروتين معين في جنس *Chironomus*. النوع *C. pallidivittatus* ينتج انتفاخ وحبيبات وبروتين لاينتجها النوع *C. tentans* الهجين بين النوعين ينتج انتفاخ صغير وكميات متوسطة من الحبيبات والبروتين. الانتفاخ الخاص في النوع الأول (وفي الهجين) يوجد فقط في الخلايا الخاصة الأربعة.

يكون ذلك هو الجزء الأهم من القصة. ولكن حقيقيات النواه (على خلاف بدائيات النواه) تستطيع إنتاج مراسلات مستقرة أي مراسلات تستطيع البقاء في الخلية لفترات طويلة. لذلك تكون هناك فرصة لتنظيم معدل التعبير عن الجينات عن طريق تنظيم معدل ترجمة المراسل. ويوجد في الواقع بعض الدلائل على أن التغير الجيني في حقيقيات النواه يشتمل على الترجمة التفاضلية للمراسل بالإضافة الى النسخ التفاضلي للجينات.

التحضير من مراسلات خلايا الدم الحمراء للأرنب يحتوي على كميات متساوية تقريبا من المراسل الخاص بتخليق السلسلة ألفا وذلك الخاص بتخليق السلسلة بيتا (وتذكر أن كل مراسل يتم نسخه من جينن مختلف). وعند وضعه في أنبوبة إختبار وحفظه

الحضانة مع كل المواد المناسبة فان هذا الخليط من المراسلات ينتج كميات متساوية
، نوعي سلاسل الجلوبين . اذا تم حقن نفس التحضير في الخلية البيضية الضخمة
ضفدعة فان هذه المراسلات الخاصة بالأرنب تترجم الى سلاسل ألفا وبيتا الخاصة
أرنب بواسطة آليات تخليق البروتين في خلايا الضفدعة . ولكن نوعي السلاسل لا
جان بكميات متساوية بل تكون النسبة بين تخليق سلاسل بيتا الى تخليق سلاسل
ما حوالي ٥ : ١ ويبدو أنه في الخلايا البيضية للضفدعة تكون كفاءة ترجمة الحامض
mRN للسلاسل بيتا أكبر منها بالنسبة للسلاسل ألفا . ومع ذلك إذا تم حقن الهيم -
لازم لاكمال تخليق الهيموجلوبين - مع المراسلات فان الانتاج المتوازن للسلاسل ألفا
بيتا يعود مرة أخرى . وعلى ذلك يبدو أن الهيم يؤثر على معدل التعبير عن الجينات عن
ريق تأثيره على معدل الترجمة .

موقف مشابه موجود في الطحلب الأخضر كلوريللا *Chlorella*. تخليق واحد من
نزيمات تفاعلات الظلام في البناء الضوئي يتم تنظيمه مستقلا عن معدل تخليق المراسل
هذا الإنزيم . تحت ظروف خاصة تحتوي الخلايا على كميات كبيرة من المراسل وتحدث
رجمة قليلة أو لاتحدث بالمرة . عند إضافة الجلوكوز الى الخلايا التي تحدث بها ترجمة فان
تخليق الأنزيم (الذي أصبح الان زائدا عن الحاجة) يتوقف في الحال . هذا التوقف
لتخليق الإنزيم يحدث أسرع كثيرا مما لو كان الجلوكوز يوقف النسخ . التفسير الأكثر
إحتمالا هو ان الجلوكوز عطل تخليق الإنزيم عند مستوي ترجمة المراسل بطريقة لم يتم
التوصل اليها بعد .

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

درسنا في هذا الباب الآليات التي يحدث بها تغير في التعبير عن الجينات كاستجابة
لاشارات تصل الى الخلية من البيئة . في حقيقيات النواه عديدة الخلايا قد تكون هذه
الإشارة هي وصول هرمون الى الخلية . ولكن الهرمون ينتقل مع الدم أو العصارة
ويمكن أن يصل الى كل خلية في جسم الكائن . ولكن لا تستجيب لذلك كل خلية .
الخلايا المستهدفة فقط هي القادرة على الإستجابة للاشارة . خلايا طلائية الرحم في
الثدييات على سبيل المثال تستجيب بسرعة لوصول الإستروجينات ولكنها لا تتأثر
بوصول هرمون الكلية إريثروبويتين erythropoietin. من ناحية أخرى تستجيب خلايا

نخاع العظم بقوة للإريثروبويتين (و ذلك بانتاج المزيد من خلايا الدم الحمراء) ولكنها لاتتأثر بوجود الإستروجينات في السائل المحيط بها.

كيف يمكن إذن التعبير عن بعض الجينات (مثل جين تخليق الأوفالبيومين) في بعض الخلايا وليس في البعض الأخر؟ قد تقول أن خلايا قناه المبيض أو طلائية الرحم تحتوي على البروتين المستقبل اللازم لذلك بينما لاتحتوي خلايا نخاع العظم عليه. وهذا صحيح. ولكن ما الذي يحدد إن كان نوع معين من الخلايا يحتوي على هذا المستقبل السيتوبلازمي اللازم لجعل الخلية تستجيب للإستروجينات أي لجعلها هدفا للإستروجينات؟ من المؤكد أنه تاريخ هذه الخلية - التاريخ الذي أدى الى تكوين طلائية الرحم في مقابل خلية نخاع العظم. إنه إذن مسار التشكل pathway of differentiation الذي سلكته تلك الخلية هو الذي يحدد في النهاية أي الجينات تكون الخلية قادرة على التعبير عنه كاستجابة لإشارات التغير. وعلى ذلك فان بحثنا عن آليات للنشاط الجيني الإنتخابي لم ينته بأي حال من الأحوال. مازال علينا أن نبحث عن آليات تنظيم الجينات التي تقود الى تشكل الخلية بصورة معينة. سوف نحاول الحصول على إجابات مبدئية عن هذا السؤال الجوهري في الباب ١٨.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ هل تتوقع أن تكون الطفرات في الجينات المنظمة سائدة أم متنحية؟ إشرح

٢ ــ هل تتوقع أن تكون الطفرات في جينات التشغيل سائدة أم متنحية؟ إشرح

REFERENCES المراجع

1- PTASHNE, M., and W. GILBERT, "Genetic Repressors", Scientific American, Offprint No. 1179, June, 1970.

2- SOBELL, H.M., "How Actinomycin Binds to DNA", Scientific American, Offprint No. 1303, August, 1974.

3- O'MALLEY, B.W., and W.T. SCHRADER, "The Receptors of Steroid Hormones", Scientific American, Offprint No. 1334, February, 1976.

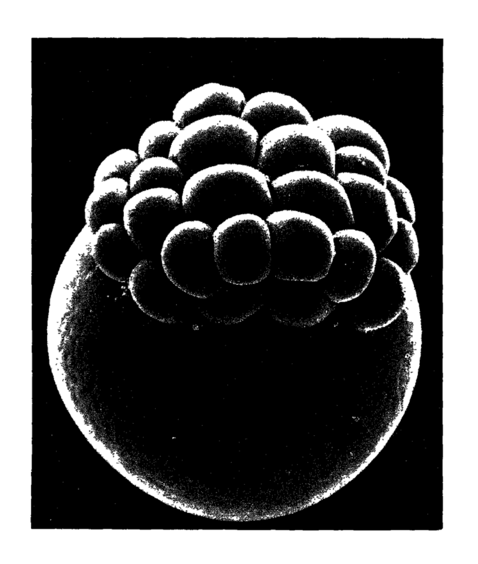
4- STEIN, G.S., JANET S. STEIN, and L.J. KLEINSMITH, "Chromosomal proteins and Gene Regulation", Scientific American, Offprint No. 1315, February, 1975. Examines the role of histones in keeping genes turned off and of nonhistone proteins in turning them on.

5- MARKERT, C.L., and H. URSPRUNG, Developmental Genetics, Foundations of Developmental Biology Series, Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1971. Chapter 6 includes the ***chrironomus tentans-pallidivittatus*** story.

6- BEERMANN, W., and U. CLEVER, "Chromosome puffs", Scientific American. Offprint No. 180, April, 1964. Includes a discussion of ecdysone-induced puffs.

PART 5 القسم الخامس

التكاثر والنشأة
REPRODUCTION AND DEVELOPMENT



صورة بالمجهر الاليكتروني المساح لجنين أسماك الزرد. (عن هـ. و. بيمز و ر. ج. كِسَّل)

CHAPTER 16 — الباب السادس عشر

التكاثر في النباتات
REPRODUCTION IN PLANTS

الباب السادس عشر
التكاثر في النباتات

من أهم مظاهر الكائنات الحية قدرتها على إكثار نوعها. ويأتي وقت لكل كائن تكون فيه قوي الأيض والنمو والاستجابة غير كافية للمحافظة على أنظمته المعقدة ضد قوى أخرى. هجوم الكائنات المفترسة أو الطفيليات أو المجاعة أو التغيرات الضارة الأخرى في البيئة أو مجرد تلك العمليات غير واضحة المعالم التي نسميها الشيخوخة تؤدي في النهاية إلى مـوت الكائن. ومع ذلك يستمر النوع species لفترات أطول بكثير من عمر الفـرد الـواحد من أفراده. ويتم بإنجاب أفراد جدد من الأفراد القدامى قبل وفاتهم أغلب الأسئلة الرئيسية في علم الأحياء تتعلق بهذه القابلية لدى الكائنات الحية على إنتاج نسخ من أنفسهم.

هناك طريقتان مميزتان لإنتاج ذرية في الكائنات الحية. واحدة منهما تسمى التكاثر الجنسي Sexual reproduction وهو إنتاج أفراد جدد تجمع بين المعلومات الوراثية التي يسهم بها نوعان مختلفان من الخلايا يمثلان بصفة عامة نوعين مختلفين من الآباء. وفي معظم الكائنات تكون هذه الخلايا هي الأمشاج (أو الجاميطات) gametes ، والطريقة الاخـرى للتكـاثـر تتم بواسـطة أب واحـد فقط. وفي هذه الطريقة المسماة بالتكاثر الـلاجنسي asexual reproduction تنتـج الـذرية بدون اتحاد مشيجين. العديد من النباتات يتكاثر بواسطة الطريقتين معاً و لكل طريقة مزاياها كما سوف نرى.

١٦-١ . تبادل الأجيال ALTERNATION OF GENERATIONS

يشتمل التكاثر الجنسي على عمليتي الاخصاب والانقسام الاختزالي. في الأخصاب تنـدمـج نواتـا المشيجـين فيرتفع عدد الكروموسومات من العدد الأحادى الى العدد

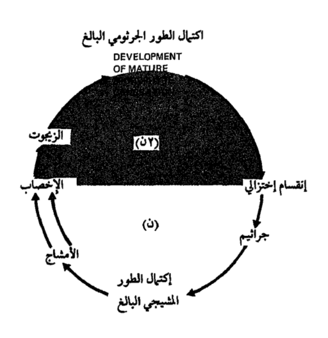
الثنائي. في الأنقسام الأختزالي يتم اختزال عدد الكروموسومات مرة أخرى من العدد الثنائي الى العدد الأحادى ومهما كان التباين في التفاصيل من كائن إلى آخر فإن هاتين العمليتين لابد أن تحدثا بالتبادل إذا كان للتكاثر الجنسي أن يستمر.

في النبـاتـات يعمل الانقسام الاختزالي والاخصاب على تقسيم حياة الكائن إلى مرحلتين متميزتيـن أو جيلين (الشكل ١٦-١). الطور المشيجي gametophyte يبدأ بجـرثـومة ناتجة من الانقسام الاختزالي. الجرثومة أحادية العدد الكروموسومي وكل الخلايا الناشئة منها تكون أيضا كذلك. من بين الخلايا التي ينتجها هذا الطور الأمشاج gametes. عنـد إندماج مشيجين يبدأ الطور الجرثومي sporophyte. وعلى ذلك فان الـطور الجـرثـومي يبـدأ بزيجـوت zygotye وهـو يحتـوي على العـدد الثنـائي من الكـرومـوسـومـات وكل الخلايا الناشئة منه بالانقسام غير المباشر تكون ثنائية العدد الكـروموسومي كذلك. ومع ذلك فإنه في النهاية تنقسم خلايا معينة اختزاليا لتكون الجراثيم spores التي تبدأ طور مشيجي مرة أخرى.

١٦-٢ : المشاكل المطلوب حلها THE PROBLEMS TO BE SOLVED

ربـما تكـون النباتات قد تطورت عن أسلاف مائية هي الطحالب الخضر. وعلى الرغم من أن بعض النباتات توجد حالياً في الماء فإنها مرتبطة في المقام الأول بالحياة على الأرض. توجـد في أفراد كل مجموعة من النباتات عدة تحورات شكلية ووظيفية تؤهلهم للحياة بعيداً عن البيئـة المـائية. كيف تتمكن النبـاتات من حل مشكلة تأمين الماء والمحافظة على خلاياهم في حالة مبللة سيكون موضوع النقاش في الجزء السابع. في هذا الباب سوف ندرس كيف تمكنت النباتات من حل مشكلة التكاثر الجنسي على الأرض.

المشكلة في الـواقـع مزدوجـة، الأمشاج خلايا مفردة ورقيقة للغاية، وفي التلقيح الخلطي لابد من وجود آلية تمكن المشيجين من الوصول الى بعضهما البعض بأمان، وتزداد المشكلة في النباتات نتيجة عدم قدرتها على الحركة، وعدم قدرة النباتات على الحـركة يخلق مشكلة أخرى وهي كيف تنتشر الذرية الناتجة من التكاثر الجنسي إلى أماكن تبعد بالقدر الكافي عن الأبوين حتى تتلقى مامحتاج اليه من ضوء الشمس والماء ومعادن التربة. هاتان المشكلتان المتلازمتان (توصيل الأمشاج الى بعضها الى البعض



الشكل ١٦-١. دورة حياة نموذجية نباتية. الانقسام الاختزالي والاخصاب يقسمان دورة حياة النبات الى طور مشيجي أحادي العدد الكروموسومي وطور جرثومي ثنائي العدد الكروموسومي على التوالي. الطور المشيجي سائد في الحزازيات والطور الجرثومي سائد في السرخسيات وعاريات البذور وكاسيات البذور. لاحظ أنه في جميع النباتات يكون انتاج الجراثيم بواسطة الانقسام الاختزالي. الأمشاج ينتجها الانقسام غير المباشر.

في أمان وانتشار النوع في أماكن جديدة) تم حلها بطرق مختلفة في المجموعات النباتية المختلفة.

١٦-٣. الحزازيات MOSSES

يتكون تجمع الحزازيات من كتل من السوق المورقة أحادية العدد الكروموسومي، ولذا فانها تنتمى الى الطور المشيجي (الشكل ١٦-٢). في الحزاز الشائع *(Polytrichum commune)* تكون السوق المورقة من ثلاثة أنواع مؤنثة ومذكرة وعقيمة (الأخيرة لا تشارك في التكاثر الجنسي ولا تعنينا الآن). يسهل تمييز السوق المذكرة عن النوعين الاخرين عن طريق قمتها المفلطحة. القطاع الطولي في قمة نبات مذكر يكشف عن عدة اعضاء تكاثر مذكرة هي الأنثريدات antheridia تكون كل منها ممتلئة بالأمشاج المذكرة. قطاع طولي مماثل في النبات المؤنث يكشف عن وجود عدة أرشيجونات archegonia كل منها لها شكل زجاجة وهي أعضاء التأنيث. تحتوي كل أرشيجونة على خلية بيضة واحدة في غرفة بالقرب من قاعدتها. في أوائل الربيع وعندما يتوفر الماء تتحرر الأمشاج المذكرة من الأنثريدات ويعمل تساقط قطرات المطر

على توزيع الأمشاج المذكرة الى النباتات القريبة. تسبح الأمشاج المذكرة على النباتات المؤنثــة نحـو الأرشيجـونـة. ربـما كانت تتبـع فرق في تركيز السكـروز المنتشر من الأرشيجونة. يسبح المشيج المذكر الى أسفل في قناة الأرشيجونة نحو البيضة ويحدث الأخصاب. الزيجوت الناتج هو أول خلية في الطور الجرثومي.

تنتج الانقسامات غير المباشرة للزيجوت الطور الجرثومي الناضج (الشكل ١٦-٢). وهو يتكون من التراكيب ثنائية العدد الكروموسومي الآتية:

١ ــ قدم foot وهـو يمتص الماء والأملاح المعدنية من الطور المشيجي الأبوي على الرغم من أن خلايا الطور الجرثومي تحتوي على الكلوروفيل فان بعض المواد الغذائية قد تمتص أيضا من الطور المشيجي الأبوى.

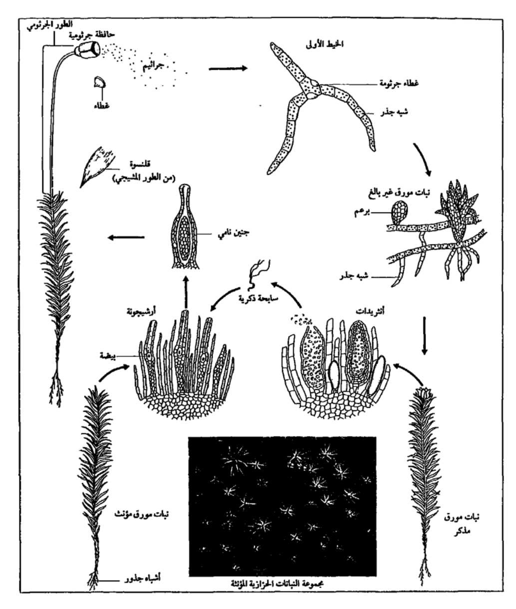
٢ ــ عنق stalk وينمو بمقدار بوصات قليلة في الهواء.

٣ ــ حافظة جرثومية sporangium تتكون عند طرف العنق وتوجد بداخلها خلايا أم الجراثيم spore mother cells. الفتحة تكون مغلقة بغطاء operculum وتكون الحـافـظة الجـرثـوميـة مغطاة بالكامل بقلنسـوة calyptra وتنشأ القلنسوة من الجـدار القـديم للأرشيجـونـة (وعـلى ذلـك فهي في الـواقع جزء من الطور المشيجي). القلنسوة هي السبب في الاسم الشائع لهذا النوع.

في أثناء الصيف تنقسم كل واحدة من خلايا أم الجراثيم اختزالياً فتنتج أربع جراثيم أحادية العدد الكروموسومي وهي بداية الطور المشيجي. وفي أواخر الصيف يتم انتزاع القلنسـوة والغطاء من الحافظة الجرثومية ويعمل انخفاض الرطوبة على انحناء حلقة الأسنان الموجودة في فتحة الحافظة الجرثومية نحو الخارج وعندئذ تنتشر الجراثيم وتمكنهـا أحجامها الضئيلة من الانتقال لمسافات بعيدة بواسطة الرياح.

اذا ما استقرت جرثومة في مكان ملائم (رطب وظليل) فإنها تنبت لتكون خيط من خلايا خضراء يسمـى الخيط الأولي protonema التشابه بين الخيط الأولي والطحالب جعل بعض علماء النبات يعتقدون أن الحزازيات قد نشأت من الطحالب. وبسرعة تظهر براعم على الخيط الأولي ومن هذه البراعم تنشأ السوق المورقة - المذكرة والمؤنثة والعقيمة - التي بدأت بها هذه القصة.

ماهي الأدوار التي يلعبهـا هذان الطوران في دورة حياة النبات الحزازي. الطور



الشكل ١٦-٢ . دورة حياة حزاز البوليتريكم . لابد من وجود ماء على سطح الأرض حتى تنتقل السابحات الذكرية من النبات المذكر الى النبات المؤنث ويحدث الاخصاب .

المشيجي ينتج الأمشاج وهو مسؤل عن القيام بالتكاثر الجنسي . العملية تتطلب وفرة من الماء إلا إذا كان الربيع جافاً فإن التكاثر الجنسي غالبا ما يفشل . الطور الجرثومي ينتج العديد من الجراثيم التي تذروها الرياح وتعمل على انتشار النوع مما يساعده على استيطان بيئـات جديدة . وعلى الرغم من أن الطور الجرثومي قد يتمكن من تصنيع

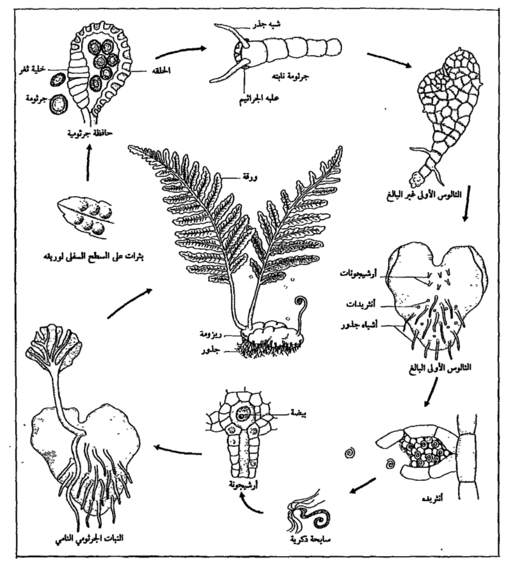
بعض غذائه فإنه يعتمد بالكامل على الطور المشيجى في الحصول على الماء والأملاح المعدنية.

١٦-٤ : السراخس FERNS

في السراخس فإننـا عادة نرى الطور الجرثومي. سرخس عيد الميلاد من أفـضل الأمثلـة (الشكل ١٦-٣). فالأوراق leaves (أو الأوراق السرخسية fronds كما جرت العادة على تسميتها) هي الجـزء الوحيـد من النبـات الذي يظهـر فوق سطح الأرض. هذه تنشـأ من ساق تحت أرضيـة - الريزمـة rhizome - تمتـد منها أيضاً الجذور roots. كل هذه الأعضاء تكون الطور الجرثومي البالغ. في أوائل الصيف تظهر بقع بنية على السـطح السفلي لوريقات الأوراق السرخسيـة (الشكل ١٦-٤). كل بقعة تسمى البثـرة sorus وتتكون من عدة حوافظ جرثومية ذات أعناق (الشكل ١٦-٣). بداخل كل حافـظة جرثومية تنقسم خلايا أم الجراثيم اختزاليا فتنتج كل منها أربع جراثيم. عنـدمـا تنخفض الـرطوبة تنفصل خلايا الشفاه رقيقة الجدر في كل حافظة جرثومية وتستقيم الحلقة annulus ببطء ثم تنطلق للأمام في حركة مباغتة فتنثر الجراثيم.

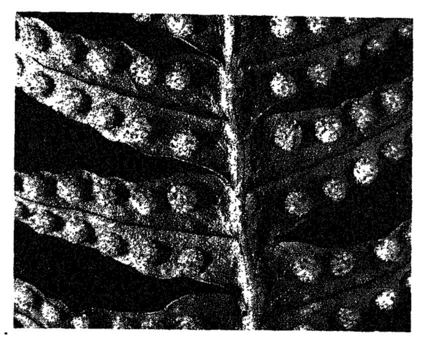
يمكنك توضيح هذه العملية بنفسك. انقع بعض وريقات سرخسية عليها بثرات ناضجـة في كحول لمدة يوم أو يومين ثم انقل بعض هذه البثرات على شريحة نظيفة بواسـطة سكـين حيث يمكنك مشاهدة تفاصيل الحوافظ الجرثومية بوضوح مع التكبير. وبمرور الحرارة الناجمة عن الاضاءة بالمجهر خلال العينة المبللة فإن الكحول يتبخر وبعد ذلك يبدأ انبثاق الجراثيم.

اذا وصلت الجراثيم السرخسية المنقولة بالرياح الى بيئة ملائمة (رطبة وظليلة) فإنها سوف تنبت لتعطى خيوطا من الخلايا ينمو كل منها الى تركيب صغير (حوالي ١ سم) مفلطح أخضر قلبي الشكل يسمى الثـالوس الأولي prothallus (الشكل ١٦-٣). ينمو الثالوس الأولي على سطح التربة ويكون مثبتاً فيها بواسطة خيوط خلوية رفيعة تسمى أشباه الجذور rhizoids وهي تقوم بامتصاص الماء والأملاح المعدنية من التربة. خلايا الثالوس الأولي كما تكون أحادية العدد الكروموسومي وهي عبارة عن الطور المشيجي البـالـغ. يوجـد على سطحة السفلي الأعضاء الجنسية: الأنثريدات لانتاج الأمشاج المـذكرة والأرشيجونات لانتاج البيضات. عندما تكون الرطوبة متوفرة بغزارة تتحرر



الشكـل ١٦-٣. دورة حيـاة لسرخس نمـوذجي. التلقيح الخلطي هو القاعدة، تسبح السابحة الذكرية من ثالوث أولى الى آخر ولابد من وجود الماء السطحي حتى يتم ذلك.

الأمشاج المذكرة وتسبح نحو احدى الأرشيجونات - عادة على ثالوس أولى آخر - لأن نوعي الأعضاء الجنسية لا يصلان بصفة عامة الى مرحلة النضج في نفس الوقت على نفس الثالوس الأولى وذلك يؤدي إلى التلقيح الخلطي وبالتالي الى فرصة أكبر للتباين في الـذرية. يحدث الاخصاب داخل الأرشيجونة ويبدأ الطور الجرثومي الجديد. ينشأ الطور الجرثومي الجنيني عن طريق الانقسامات المتكررة للزيجوت. أحد التراكيب التي



الشكل ١٦-٤ . تجمعات الحوافظ الجرثومية على السطح السفلي لوريقة أحد السرخسيات.

توجد في الجنين ولكنه لا يوجد في الطور الجرثومي البالغ هو القدم foot. هذا العضو يخترق أنسجـة الثـالـوس الأولي ويستمـد الرطوبة والغذاء منه حتى تتمكن الجذور والريزومة والأوراق من الاكتفاء الذاتي. لاحظ أنه على الرغم من ضآلة الثالوس الأولي بالمقارنة مع الطور الجرثومي البالغ إلا أنه ما يزال نبات مستقل وذاتي التغذية بل أنه يعول الطور الجرثومي الجنيني أثناء المراحل المبكرة لنشأته.

١٦-٥ : عاريات البذور GYMNOSPERMS

عاريات البـذور المـألـوفـة للكثير منّا هي المخروطيات conifers (انواع الصنوبر والتنوب . . . الخ). الطور الجرثومي (وهو الجزء الوحيد الذي يراه المشاهد العادي) ينتج ليس فقط نوع واحد وإنما نوعين مختلفين من الجراثيم. فهناك الجراثيم الصغيرة microspores التي تنبت لتعطي الطور المشيجي المذكر وهناك الجراثيم الأكبر منها وهي الجراثيم الكبيرة megaspores وهي التى تتطور فتصبح الطور المشيجي المؤنث. يتم انتـاج كل من هذين النوعين في حافظة جرثومية خاصة به تسمى الحافظة الجرثومية الصغـيرة microsporangium والحـافـظة الجـرثـومية الكبيرة megasporangium على التـوالي. في أكثـر عاريات البذور انتشارا (أي المخروطيات) يوجد كلا النوعين من

الحوافظ الجرثومية في المخاريط cones ، المخاريط المؤنثة (الشكل ١٦-٥) مألوفة لكل الناس تقريباً. تظهر المخاريط المذكرة في الر بيع ويكون عمرها أقصر بكثير. في داخل هذه المخاريط تنتج الجراثيم الصغيرة بواسطة الانقسام الاختزالي وتبدأ الطور المشيجي المذكر. وقبل تحررها يحدث انقسام غير مباشر في نواة كل جرثومة صغيرة لتنتج حبة لقاح رباعية الخلايا وعندئذ تتحرر حبة اللقاح وتنطلق في الهواء.

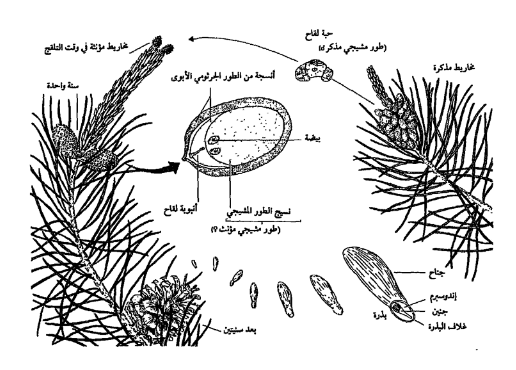
في المخاريط المؤنثة تمر الجرثومة الكبيرة بفترة تطور داخل المخروط ويكون الناتج من هذا التطور هو الطور المشيجي المؤنث (الشكل ١٦ - ٥) . هذا التركيب الصغير لا يتحـرر من المخـروط بل يظل داخـل أنسجـة الـطور الجرثـومي الأبـوي . قد يبدو ذلك تغيراً بسيطاً ولكنه على جانب كبير من الأهمية بالنسبة لنجاح عاريات البـذور. فعن طريق الاحتفـاظ بالـطور المشيجي المؤنث في أنسجة الطور الجرثومي الأبوي لاتكون الرطوبة الخارجية لازمة للإخصاب. تحمل الرياح حبوب اللقاح الى المخاريط المؤنثة وهناك تنبت. في عاريات البذور الاولى ربما كانت تنطلق أمشاج مذكرة متحركة motile ويمكنها السباحة نحو البيضة في الأرشيجونة دافعة نفسها في سائل من أنسجة الطور الجرثومي الأبوي. هذا السائل لابد أنـه مستمـد في النهايـة من مجمـوع جذري ممتد في التربة. وبـذلك تكـون الحاجة الى الماء السطحي قد ألغيت. شجرة المعبد gingko الذي يزرع عادة في الحدائق العامة بالمدن هو أحد عاريات البذور التي مازالت تلجأ الى هذه الطريقة في الاخصاب. في عاريات البذور الحديثة لا ينتج الطور المشيجي المذكر أمشاج مذكرة سابحة وبدلاً من ذلك تنبت حبه اللقاح لتكون أنبوبة رقيقة هي أنبوبة اللقاح pollen tube وهذه تنمو داخل أنسجة المخروط المؤنث حتى تصل بالقرب من البيضة (في الصنوبريات قد يستغرق ذلك عاماً كاملاً). عندئذ تنفجر الأنبوبة وتندمج نواة ذكرية spermnucleus مع البيضة لتكوين الزيجوت. يظل الموقف الأساسي بلا تغير اذ ان عملية الاخصاب الدقيقة تتم في أعماق أنسجة الطور الجرثومي الأبوي حيث تكون محمية من القسوة المحتملة للجو الخارجي.

مع إنتاج نوعين من الجراثيم ونوعين من الطور المشيجي فإن جراثيم عاريات البذور لا تستطيع القيام بوظيفة الانتشار كما كانت تفعل في الحزازيات والسرخسيات. ففي الحـزازيات والسرخسيات تستـطيع الجـرثومة المفردة أن تنبت في التربة لتكوين طور مشيجي عليه كلا النـوعين من الأعضاء الجنسية ويمكن أن يتبع ذلك تكاثر جنسي

وسرعان ما يستقر الكائن في البيئة الجديدة. وبذلك يحدث انتشار النوع. وعلى العكس من ذلك فإن جراثيم عاريات البذور لا يمكن أن تكون وسائل انتشار. فالمكان الوحيد الذي يمكن أن تنبت فيه الجرثومة الصغيرة التي حملتها الرياح هو المخروط المؤنث لنفس النبات أو يفضل (لماذا ؟) أن يكون لنبات آخر من نفس النوع فالجرثومة الصغيرة تنتقل فقط من نبات إلى نبات وهذا لا يحقق إنتشار النوع إلى موقع جديد.

وظيفـة الانتشار تقوم بها البذرة seed فبعد الاخصاب ينمو الزيجوت بواسطـة عـد انقسـامـات مباشـرة ليعطي طوراً جرثوميا جنينيا ضئيلاً (الشكل ١٦-٥) وينمو حول هذا الجنين نسيج مساعد مختزن للغـذاء يسمـى الاندوسبـرم endosperm وهو مستمد من خلايا الطور المشيجي المؤنث ولذا فإنه أحادي العدد الكروموسومي. ومع ذلك فإن غذاءه قد جاء من الطور الجرثومي الأبوي. ينشأ حول الجنين والاندوسبرم غلاف واقي من نسيج الـطور الجـرثومي الأبوي وعادة يكون لهذا الغلاف جناح رقيق على أحد جوانب البذرة. كل هذه النشاطات تتطلب عاماً آخر لاكتمالها في الصنوبريات. وفي نهاية هذه لفترة يتضح المخروط المؤنث وتخرج منه البذور واحدة تلو الأخرى. يعمل جناح غلاف البذرة كأداة دفع ويزيد من المسافة التي تقطعها البذرة في انتقالها بواسطة الرياح كما يعمل غلاف البذرة نفسه على حماية الجنين من الجفاف. إذا وصلت البذرة الى مكـان ملائم (متوسط الرطوبة) فإنها سوف تمتص الماء ويبدأ الجنين في عمليات الأيض السريع ويأخذ في النمو. هذا الاستئناف للنمو يسمى الإنبات ermination في البداية يكون النمو على حساب الغذاء المختزن في الأندوسبرم. وعندما تصعد البادرة seedling الى الضوء يظهر الكلوروفيل ويبدأ النبات في تصنيع غذاءه بنفسه بواسطة البناء الضوئي. يتم استهلاك الاندوسبرم تماماً ويتساقط غلاف البذرة فتكون كل خلية من النبات النامي منحدرة من الزيجوت.

وبالمقارنة مع الأطوار المشيجية السابقة فإن الطور المشيجي لعاريات البذور لا يزيد عن كونه أداة للتكاثر إلا قليلا. فكلا من الطور المشيجي المذكر والطور المشيجي المؤنث ضئيل ويعتمد في تغذيته بالكامل على الطور الجرثومي الأبوي. الأمشاج لا تتلاقى إلا بإستخـدام تراكيب من الطور الجرثومي الأبوي. الجنين النامي لم يعد محمياً بالطور المشيجي كما في الحـزازيات والسرخسيات ولكنـه يتلقى الحـماية والغـذاء من الطور



الشكل ١٦-٥ . دورة الحياة لأحد الصنوبريات. يحدث اخصاب البيضة في داخل أنسجة الطور الجرثومي الأبوى.

الجرثومي الأبوي. (الاندوسبرم ينتمي الى الطور المشيجي ولكن الغذاء المختزن فيه يأتي من الطور الجرثومي). يستمر الطور الجرثومي في تحقيق الانتشار للنوع النباتي اذ أن هذا الانتشار لم يعد يتحقق بواسطة جراثيم تحملها الرياح ولكن بواسطة بذور تنقلها الرياح.

كاسيات البذور ANGIOSPERMS

دورة حياة النباتات كاسيات البذور – أو النباتات الزهرية – تشبه دورة حياة عاريات البذور. وعلى الرغم من وجود اختلافات في التفاصيل في الأنواع العديدة من كاسيات البذور فإن السمات الأساسية لدورة حياة كاسيات البذور تكون مشتركة بينهم.

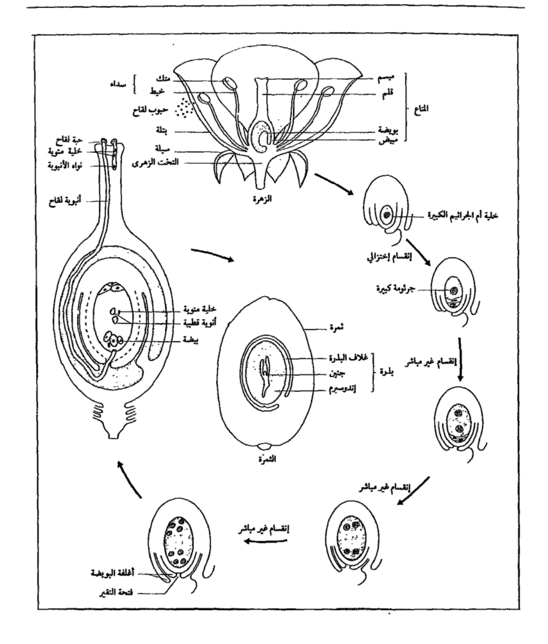
١٦-٦ : الزهرة وتلقيحها THE FLOWER AND ITS POLLINATION

في كاسيات البذور يتم إنتاج الجراثيم الصغيرة والجراثيم الكبيرة في الأزهار flowers ، في أغلب كاسيات البذور تكون الأزهار كاملة perfect أي أن كل زهرة بها

الحوافظ الجرثومية الصغيرة والحوافظ الجرثومية الكبيـرة وهي لذلـك تنتـج كلا النـوعي من الجـراثيم . تنشـأ الجـراثيـم الصغيـرة في الأسـدية stamens وتنشـأ الجراثي الكبيرة في المتاع pistil (الشكل ١٦-٦). تتكون السداة من جسم مفصص هو المتك anther (أو الحافظـة الجرثوميـة الصغيـرة) يدعمه خيط filament. الانقسام الاختزالي في كل خلية أم الجراثيم الصغيرة يؤدي الى تكوين أربع جراثيم صغيرة وتتحول كل منـ بعد ذلك الى حبة لقاح pollen grain ثنائية الخلايا ولها جدار خارجي صلب. احدى خليتي حبة اللقاح تسمى خلية الأنبوبة tube cell والأخرى هي الخلية التناسلي generative cell.

يتكون المتاع من الميسم stigma والقلم style والمبيض ovary ، يحتوي المبيض على الحـوافظ الجرثومية الكبيرة أو البويضات ovules ، و يختلف عدد وترتيب البويضات داخل المبيض كثيراً من نوع الى نوع. الانقسام الاختزالي لخلية أم الجراثيم الكبيرة ينتج ٤ خلايا أحادية العدد الكروموسومي : الجرثومة الكبيرة وهي ضخمة وثلاث خلا صغـيرة سرعان ما تتحلل، تنقسم نواة الجرثومة الكبيرة ثلاثة انقسامات غير مباشر ومتتـابعـة. تتـوزع الأنوية الثمان الناتجة وتحاط بجدر خلوية كما هو مبين في الشكل ١٦-٦. هذا هو الطور المشيجي المؤنث البالغ. أهم خليتان هما خلية البيضة egg cell والخليـة الكبيـرة المـركـزيـة والتي تحتـوي في معـظم كاسيـات البـذور على نـواتـير قطبيتيـن polar nuclei. من هذه الخلية الأخيرة سوف ينتج الاندوسبرم في البذرة.

على الرغم من أن إنتقال حبوب اللقاح بواسطة الهواء موجود في مجموعات معينة من كاسيات البـذور (مثـل النجيليات grasses) فإن كاسيات البـذور تتميز بالمجموع الكبيرة من الحيوانات التي تساعـد في عمليـة التلقيـح pollination يرتبط مع الأسدي والمتـاع عدة تراكيب مسـاعـدة من أوضحهـا البتلات petals ذات الألوان الزاهي (تسمي في مجموعها بالتويج corolla) وحولها محيط من السبلات sepals (هو الكأس calyx). قد يوجد مع البتلات غدد تفرز روائح عطرية. إن هذه التراكيب المساعدة هي التي تدخل البهجة والجمال إلى نفوسنا. في الغابات والحقول والحدائق والبيوت المحمية تكون الأشكـال والألوان المتعددة للنواتج مبعث الارتياح للجميع، فيما عدا بعض الأنواع المزروعة فإن الأشكال والألوان لا توجد فقط من أجل سعادتنا. إنها تعمل على جذب حيوانـات معينة تأخذ في طريقها حبوب اللقاح من المتك لتضعها على الميسم عنده



الشكل ١٦-٦. دورة حياة نبات من كاسيات البذور. تنشأ الثمرة من جدار المبيض.

تنتقل من زهرة الى أخرى.

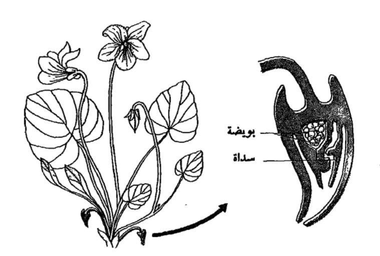
غالباً ما تحتوي الأزهار التي يحدث فيها التلقيح بواسطة الحيوانات على غدد رحيق nectaries تفرز محلولا سكريا (أو رحيقا) وتكافىء الحيوان على زيارته لها. تقوم الطيور (مثل الطائر الطنان) والخفافيش بتلقيح بعض الأزهار ولكن الغالبية العظمى تلقحها الحشرات، فالخنافس والذباب والفراشات والنحل ملقحات نشطة. قد تكون

العلاقة بين النبات والحيوان غير وطيدة فبعض كاسيات البذور يقوم بتلقيحها عدة أنواع من الحشرات وبعض الحشرات يقـوم كل منهـا بتلقيح عدة أنواع من النباتات. في حالات أخرى تكون العلاقة أكثر وثوقاً. هناك نوع من الأروكيد الاستوائي لا يلقحه إلا نوع واحـد فقط من الفراشات وهو لا يجمع الرحيق الا من نوع واحد فقط من الأزهار فالفراشات لها خرطوم طوله ٢٥ سم والأوركيد به غدة رحيق تقع على عمق ٢٥ سم. بعض أزهار الأوركيد الأخرى يوجد بها متاع له شكل ونمط لوني يحاكي بطون اناث حشرات معينة وعندما تحاول ذكور هذه الحشرات التزاوج مع العديد من هذه الأناث الكاذبة فإنها تنقل حبوب اللقاح من زهرة الى أخرى.

بصفة عامة فإن الأزهار التي تقوم الحشرات بتلقيحها تكون كاملة حيث تحتوي على الأسدية والمتاع في نفس الزهرة. هناك فائدتان من ذلك. الأولى أن احتمال التلقيح يكون أكبر ففي كل زيـارة يتـم وضـع حبـوب اللقاح من آخر زهرة كما يتم التقاط شحنه جديدة من حبوب اللقاح. في الأزهار الناقصة imperfect flowers والتي تحتوي إمَّا على المتك فقط أو المتاع فقـط يكـون لـزامـا علـى الحشـرات الملقحـة أن تـزور أزهـار مذكـرة وأزهـار مؤنثـة بالتبـادل حتـى تحقـق نفـس الكفـاءة كـأداة تلقيـح . الثانية أنه إذا ما فشل التلقيح بين أزهار مختلفة (أي التلقيح الخلطي cross-pollina-tion) فإن الزهرة تكون قادرة على تلقيح نفسها ويظل إنتاج البذور ممكناً على الرغم من أن التركيب الوراثي المتشابه للأمشاج سوف يقلل من مقدار التباين في النسل.

تكـون أزهـار بعـض كاسيـات البـذور متحـورة بحيـث يكـون التلقيح الذاتي self-pollination هو القاعدة وليس الاستثناء. كما لاحظنا في الباب العاشر فإن بتلات البسلة تغـطى تمامـاً الأسـدية والمتاع بحيث لا تستطيع الحشرات الوصول الى هذه التراكيب. معظم أنواع البنفسج violets تنتج بالإضافة الى الأزهار الكبيرة التي تلقحها الحشرات أزهـارا أصغـر لا تتفتـح أبداً ولا تتعرض المتوك والمبايض فيها للحشرات الملقحـة. النظرة الى الشكل ١٦-٧ سوف توضح لماذا لا يحدث في هذه الأزهار الا التلقيح الذاتي فقط.

تحورات الأزهار التي تساعد على التلقيح الخلطى أكثر شيوعاً من تلك التي تعمل على منعه. ففي كثير من الأنواع يكتمل نضج الأسدية والمتاع في أوقات مختلفة. وفي بعض الأنواع تترتـب الاجـزاء الزهريـة بحيث تكـون الفرصـة أمـام انتقـال حبـوب



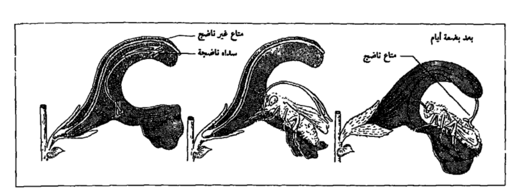
الشكل ١٦-٧. أزهار البنفسـج. الأزهار ذات البتـلات تلقـح خلطيا. الأخرى (مبكرة) تلقح ذاتيا.

اللقـاح من المتك الى الميسم ضئيلة للغاية. في أزهار القصعين *Saliva* تجتمع هاتان الآليتان معاً بالاضافة الى تركيب مفصلي غير عادي للاسدية التي تنحني لأسفل فتلقى بحبوب اللقاح على النحلة التي تحركها. في العديد من كا سيات البذور (مثل البرسيم الأحمر وبعض أصناف التفاح) لا تنبت حبوب اللقاح على مياسم نفس النبات وهذه النباتات تسمى ذاتية العقم self-sterile.

آلية أخرى لضمان التلقيح الخلطى هي وجود أزهار غير كاملة على نباتات منفصلة. الأنـواع التي يحدث فيهـا ذلك (مثل الصفصاف والحور ونخيل البلح) تسمى ثنائية المسكن dioecious. (الأنـواع ذات الازهار الناقصة على نفس النبات تسمى أحادية المسكن monoecious التلقيح بين هذه الأزهار لا ينتج اختلافات وراثية أكثر مما ينتجة التلقيح الذاتي في نفس الزهرة).

في المكان الواحد تزهر نباتات النوع الواحد في نفس الوقت تقريباً. يحدث ذلك عادة حتى ولـو كانت النبـاتـات قد بدأت النمو في أوقات مختلفة. وكما سنري في الباب السادس والعشرين فإن هذا الأزهار المتزامن يكون استجابة للتغير في طول النهار والليل كلما تقدم الموسم وهو كذلك عامل مهم في تشجيع التلقيح الخلطي.

التركيز على كاسيات البذور التي يتم فيها التلقيح بواسطة الحيوانات لا يجب أن يحجب عنـا حقيقـة أن عدداً كبـيراً من كاسيات البذور يكون التلقيح فيها بواسطة الرياح. فأنواع الحور والبلوط والدردار والبيتولا ولسان الحمل والرجيد والنجيليات وكثير



الشكل ١٦-٨. التلقيح في القصعين. تضمن التلقيح الخلطي بواسطة: (١) نضج الأسدية قبل المتاع، (٢) آلية تلقيح تنثر حبوب اللقاح على الحشرة الزائرة، (٣) النمو للمتاع بحيث يكنس ظهور النحل الذي يواصل سعيه في الزهرة من أجل الرحيق.

غيرها يكون التلقيح فيها بواسطة الرياح وأزهارها، ليس فيها بتلات ولا روائح ولا رحيق، كما أنها غالباً ما تكون ناقصة (كما هو الحال في مخاريط عاريات البذور التي يكون فيها التلقيح هوائياً أيضاً). تتعرض أسدية الأزهار المذكرة للرياح وتنتج كميات كبيرة من حبوب لقاح خفيفة وجافة. حبوب اللقاح التي تذروها الرياح قد تسبب حمى الهشيم hay fever عند الآدميين. المياسم في الأزهار المؤنثة غالباً تكون طويلة ولزجة وعادة يحتوي المبيض على عدد قليل من البويضات.

على الرغم من أن الأزهار التي يكون التلقيح فيها بواسطة الرياح ليست لها قيمة جمالية إلا أنها تكون مسئولة عن قدرتنا على إيجاد الوقت للتمتع بكل القيم الجمالية. كل الحبوب التي تأكلها تأتي من أزهار التلقيح فيها يكون بواسطة الرياح. وكمجموعة فإنها تشكل بطريق مباشر أو غير مباشر الجزء الأكبر من غذاء الانسان..

عندما تصل حبة اللقاح إلى الميسم بطريق أو بآخر في زهرة نبات من نفس النوع فإنها تنبت لتعطى أنبوبة لقاح. الخلية التناسلية تنقسم بانقسام غير مباشر فتعطي خليتين منـويتـين وتهـاجر هاتان الخليتان مع نواه خلية الأنبوبة الى داخل أنبوبة اللقاح كلما تعمقت الى داخل غرفة البويضات. أنبوبة اللقاح ومحتوياتها تشكل الطور المشيجي البـالـغ. تدخل انبوبة اللقاح الى داخل البويضة من خلال فتحة النقير micropyle (الشكل ١٦-٦) ثم تتهتك وتندمج إحدى الخلايا المنوية مع البيضة فيتكون الزيجوت ثنائي العدد الكروموسومي (٢ن). تندمج الخلية المنوية الاخرى مع النواتين القطبيتين

لتكوين نواة الأندوسبرم. معظم كاسيات البذور يوجد بها نواتان قطبيتان ولذلك يكون الاندوسبرم ثلاثي العدد الكروموسومي (٣ن) وتتحلل نواة الأنبوبة.

١٦-٧ : البـذرة THE SEED

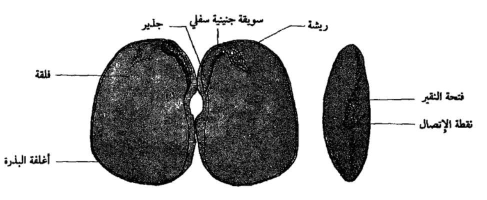
يؤدي الانقسـام غير المباشر للزيجوت ونواة الاندوسبرم الى تكوين البذرة (الشكل ١٦-٩) وهي تتركب من:

١ ــ **الـريشـة** plumule وهي تتكون من ورقتين جنينيتين تتحولان الى أول ورقتين حقيقيتـين في البـادرة seedling وبـرعم طرفي (أو قمي). البرعم الطرفي هو المرستيم (أو النسيج الانشائي) meristem الذي سوف ينشأ منه كل نمو الساق فيما بعد.

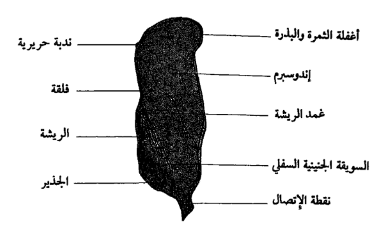
٢ ــ **السـويقـة الجنينيـة السفلي** hypocotyl **والجذيـر** radicle **وهما ينموان** لتكوين الساق والجذر الابتدائي على التوالي.

٣ ــ **فلقـة واحـدة أو فلقتين** cotyledons لاختزان الغذاء الذي سوف يستفاد منه عند انبات البذرة. كاسيات البذورالتي يكون فيها فلقتين تسمى ذوات الفلقتين dicots. الفول مثال مألوف (الشكل ١٦-٩). كاسيـات البـذور التـي توجـد بهـا فلقـة واحـدة تسمى ذوات الفلقـة الـواحـدة monocots الـذرة (الشكل ١٦-١٠) والنجيليات الأخرى من ذوات الفلقة الواحدة.

الغـذاء المـوجـود في الفلقات مستمد من الاندوسبرم وهو بدوره تلقاه من الطور الجـرثـومي الأبـوي. في كثـير من كاسيات البـذور (الفول مثال جيد) يتم استنفاذ



الشكل ١٦-٩. التراكيب في بذرة نموذجية لأحد ذوات الفلقتين وهو الفول.



الشكـل ١٦-١٠. التراكيب في حبـة ذرة. لأن جدارهـا الخـارجي مستمـد في الـواقـع من جدار المبيض فان حبـة الذرة عبارة عن ثمرة بها بذرة واحدة.

الاندوسبرم بالكامل وعند اكتمال تكوين البذرة يكون مخزونه من الغذاء قد انتقل كله الى الفلقات. في البعض الآخر يستمر الاندوسبرم في البذرة الناضجة. ينطبق ذلك على بعض ذوات الفلقتين وكل ذوات الفلقة الواحدة. خلايا الأندوسبرم عادة تكون ثلاثية العـدد الكروموسومي (٣ن) على خلاف الاندوسبرم أحادي العدد الكروموسومي في المخـروطيات وبقية عاريات البـذور (راجع الجزء ١٦-٥). وبينما تواصل التراكيب الموجودة داخل البذرة نموها تتغلظ جدر البويضة لتكوين الغلاف الواقي للبذرة.

البذرة إذن هي طور جرثومي جنيني كامن dormant له مخزون غذائي وأغلفة واقية. وهو يؤدي وظيفتين : (١) انتشار النوع في أماكن جديدة (٢) المحافظة على النوع أثناء الأوقـات التي تكون فيها الظروف المناخيـة غير ملائمة. الحوليات "annuals" (مثل الفول ومحاصيل الحبوب والكثير من الحشائش) يمكنها الاستمرار على قيد الحياة فقط عن طريق انتاج بذور مقاومة. عند بدء الجو الجليدي في الخريف تموت النباتات البالغة ومـع ذلك يبقي الكثير من بذورها حياً وإن كان كامناً خلال الشتاء. عندما تصبح الظروف مواتية مرة أخرى لنمو النبات تنبت البذور وينشأ جيل جديد من النباتات البالغة.

١٦-٨. إنتشار البذور: الثمرة SEED DISPERSAL: THE FRUIT

الثمرة هي نتاج نمو جدار المبيض وأحياناً أجزاء زهرية أخرى كذلك وهي تحوي بداخلها البذور. بالنسبة لعالم الأحياء فإن كلمة الثمرة لا تقتصر فقط على تلك الأنواع

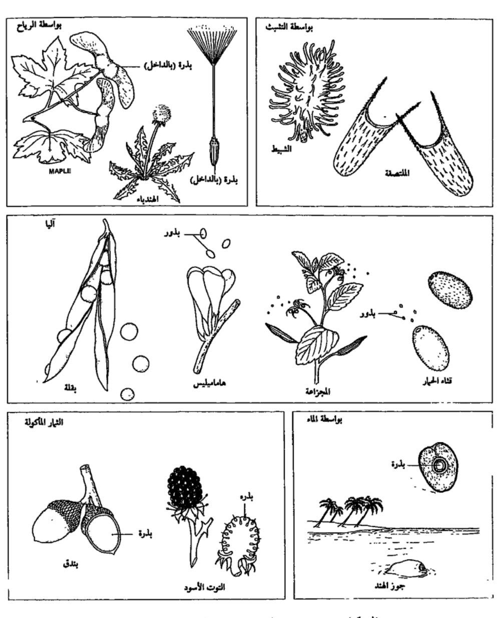
الغضة التي نستمتع بأكلها. الشكل ١٦-١١ يوضح بعض أنواع الثمار في كاسيات البذور.

في كل الأحوال تساعد هذه الثمـار في إنتشـار محتوياتهـا من البذور. فثمرة القيقب maple ومـظلـة الهندباء dandelion هما مثالان لانتثار البذور بواسطة الرياح. ثمار الشبيـط cocklebur والملتصقـة sticktights تحقق الانتشـار للبـذور التي توجـد بداخلها عن طريق التشبث بكساء أو فراء حيوان مار بالقرب منها وقدرة الحيوان على الحركة تساعد على انتقال البذور الى أماكن جديدة.

ثمرة جوز الهند coconut تحقق الانتشـار لبـذرتها الوحيدة عن طريق الطفو Float-ing الى أماكن جديدة. تجمعات من نخيل جوز الهند تحيط بكل جزر المحيط الهادي. الأشجار المائلة فوق الماء تسقط ثمارها والثمرة لا تنبت في الماء المالح ولكنها تظل حية (أي قابلة للإنبات) لفترات طويلة بينما تحملها تيارات المحيط وعندما تلقي بها الأمواج الى أحد الشواطيء فإنها قد تنبت لتعطي نخلة جديدة بالغة.

مـن أكثـر تحـورات الثمـار إثـارة للاهتمـام تلـك التـي تحقـق الانتشـار الألـي. قـرون البقوليـات legumes والهـامـا ميليس Witch - hazel والمـجـزاعـة touch-me not وقثـاء الحمـار squirting cucumber كلها تلفظ ما بها من بذور بقوة عندما تجف الثمار في الخريف. وبينما لا تحقق المسافات التي تقطعها هذه البذور الانتشار السريع للنوع النباتي فإنها تقلل من فرص منافسة البادرات للآباء على ضوء الشمس والرطوبة ومعادن التربة.

الثـمار التي تؤكـل هي أيضـا وسـائل فعالة للانتشـار. فالسناجب وفئران الحقول والقوارض الأخرى نادراً ماتأكل كل البندق والحبوب التي تقوم بتخزينها في الخريف وعنـد حلول الربيع تنبت البذور المنسيـة علـى مسافـات بعيـدة مـن النبات الذي أنتجها. الأنواع المختلفة من الثمار اللبية berries تتميز ببذور ضئيلة يمكنها أن تمر دون تحطيم خلال القناة الهضمية للطائر أو الحيوان الذي يبتلعها وعندما يطرد الحيوان هذه البـذور فإنهـا تجد نفسهـا في موقع جديـد تمامًا أمَّا السمـاد الذي يخـرج من الحيـوان مع هـذه البذور فـإنه يعمل كمصدر غني للمعادن والدوبال humus للبادرات الناشئة.



الشكل ١٦-١١. الثمار ودورها في انتشار البذور .

١٦-٩. الانبـــات GERMINATION

الإنبات هو استئناف النبات الجنيني الموجود داخل البذرة للنمو (الشكل ١٦-١٢) ولا بد له من درجة حرارة مناسبة وكمية مناسبة من الرطوبة ومدد كافي من الأكسجين. ما هو مناسب أو كافي لنوع نباتي قد لا يكون كذلك لنوع آخر ولكن لا بد من توفر هذه

الشروط الثلاثة لكل نوع بدرجة ما.

العديد من البذور يتطلب فترة كمون قبل الانبات. فمثلاً بذور التفاح والخوخ لن تنبت الا بعد فترة طويلة من التبريد وهناك دليل على وجود مثبط كيميائي في البذور عند بدء تكوينها. يتكسر هذا المثبط تدريجياً عند درجات الحرارة المنخفضة حتى لا يوجد منه ما يكفي لمنع الإنبات إذا ما كانت بقية الظروف ملائمة. (ما هي قيمة هذه الآلية بالنسبة لبقاء النوع؟). بذور الكثير من كاسيات البذور الصحراوية بها مثبطات تمنع الانبات حتى يتم غسل هذه المواد بالماء في التربة وفي هذه العملية تكون كمية المياة المطلوبة أكثر مما يلزم للانبات فقط.

التعرض للضوء لمدة مناسبة هو أحد شروط الانبات أيضاً في بعض الحالات. فبذور بعض النباتات التي تنمو في المستنقعات لن تنبت الا بعد التعرض للضوء لفترة طويلة. وفي المقابل فإن بذور بعض النباتات الصحراوية لن تنبت إذا تعرضت للضوء لفترة طويلة. ماهي قيمة هذه الاستجابات بالنسبة لبقاء النباتات.

دورة حياة كاسيات البذور تشبة أساساً دورة حياة عاريات البذور فهي مثلها تسمح للنبات بالحياة الناجحة في البيئة الأرضية. ومع ذلك فإن كاسيات البذور أكثر تنوعاً ونجاحاً بكثير من عاريات البذور. هناك حوالي ٢٥٠ ألف نوع من كاسيات البذور الآن مقارنة بحوالي ٦٥٠ نوع فقط من عاريات البذور. أكثر من ذلك فإن كاسيات البذور قد استغلت و استعمرت بيئات أكثر بكثير من عاريات البذور. فهي تنمو في التندرا القطبية والسهول وغابات المناطق المعتدلة والصحاري والأدغال بأشكال وأعداد أكبر بكثير من أعداد وأشكال عاريات البذور. الكثرة الهائلة والتنوع الكبير وسعة الإنتشار لكاسيات البذور في كل أنحاء العالم هي أكبر دليل على القيمة البقائية للتحورين التركيبيين الفريدين فيها : الزهرة والثمرة.

١٦-١٠. التكاثر اللاجنسي في النباتات
ASEXUAL REPRODUCTION IN PLANTS

تستطيع كل الأنواع النباتية تقريباً إكثار أنفسها بطريقة لاجنسية تماماً كما تستطيع أداء التكاثر الجنسي. ويتم في التكاثر اللاجنسي إنتاج ذرية جديدة من أب واحد ولا يجب



الشكل ١٦-١٢. ثلاث مراحـل في انبـات بذور الفول مسجلة بالتصـوير البـطيء. الفلقـات تحمى الـريشـة من التلف أثناء خروجها من الـتربـة. (بتصريح من شركة بتسبرة للألواح الزجاجية).

النظر إلى التكاثر اللاجنسي على أنه بديل بدائي للتكاثر الجنسي، فإن التكاثر الجنسي يكـاد يكون قديم قدم الحياة نفسها. فالتكاثر اللاجنسي يمثل ببساطة وسيلة بديلة لإنجاب الذرية وله مزاياه (وعيوبه) الخاصة به.

على الرغم من أن كل عضو نباتي قد تم استغلاله في التكاثر اللاجنسي إلا أن الساق كانت أكثرهم استغلالاً. في بعض الأنواع تنمو الساق الهوائية على هيئة أقواس فوق سطح الأرض، وتنشأ الجذور عند أطرافها فتكون أفرادا جدد. السوق الأفقية (تسمى مدادات Stolons) لنبات الفراولة تنتج نباتات جديدة لا تلبث أن تحيا حياة مستقلة، (الشكل ١٦-١٣).

النبـاتـات التي يكـون لها سوق تحت أرضية (ريزومـات rhizomes ، كورمـات Corms ، أبصـال bulbs ، درنـات tubers- أنـظر الشكل ٣٨-١٤) تستعمل هذه الأعضاء في التكاثر تماماً كما تستخدمها في تخزين الغذاء. فمثلاً أنواع السوسن iris والزنابق lilies تنتشر بسرعة من خلال نمو ريزوماتها.

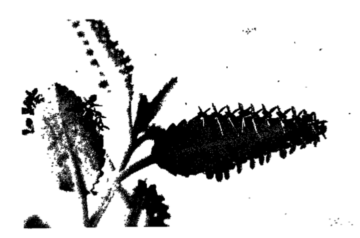
بعض النباتات (مثل الهندباء) تستطيع تكوين أفراد جدد من جذورها والقليل من النبـاتات يستخدم أوراقه لهذا الغرض (الشكل ١٦-١٤). ثمار الحمضيات Citrus وبعض الأنواع تستخدم حتى البذور كطريقة للتكاثر اللاجنسي وهي عملية تسمى apomixis. في أحد الأشكال تتكون البيضة بحيث تكون ثنائية العدد الكروموسومي (٢ن) وتنمو دون أن يتم اخصابها. في صورة أخرى تتحول خلايا البويضة (٢ن) إلى جنين بدلاً من أو بالاضافة إلى البيضة المخصبة.

على الرغم من أن التكاثر اللاجنسي في النباتات يأخذ صوراً عديدة مختلفة إلا أنها تشترك جميعا في سمة أساسية واحدة: الانقسام غير المباشر. الأفراد الجدد ينشأون من الانقسـام غير المبـاشر لخلايا أب واحـدة. وإذا استبعدنا احتمال حدوث الطفرة فإن ذلك يضمن أن الـذرية تكون مطابقة تماماً للاب. في غالبية أمثلة التكاثر اللاجنسي فإن الذرية تنشأ بالقرب من الأب فإذا افترضنا أن الأب كان متأقلما تماما مع المكان فإن الذرية تكون متأقلمة معه كذلك.

لأن بعض النباتات تكون فيها صفات مرغوبة بصفة خاصة (لون الأزهار، الطعم، مقاومة الأمراض، الخ) فإن النباتات ذات القيمة الاقتصادية يتم اكثارها عن عمد بوسائل لاجنسية. العقل cuttings يمكن أخذها من النبات الأب وغرسها (الشكل



الشكل ١٦-١٣. التكاثر اللاجنسي في الفراولة. النباتات الجديدة تنشأ على طول السوق الأفقية (المدادات).



الشكل ١٦-١٤. أوراق نبات الزينة الشائع بريوفيللم. لاحظ النبتات الصغيرة التي نشأت بالتكاثر اللاجنسي على طول الحافة.

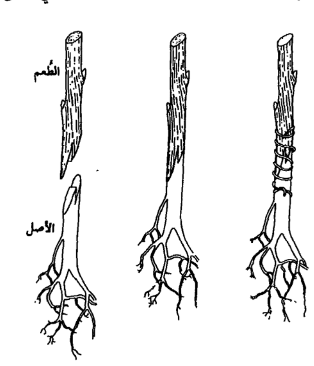
٢٦ ـ ١٥)،التطعيم grafting هو طريقة شائعة لاكثار الأصناف المرغوب فيها من الشجيرات والأشجار. العاملون في المشاتل فقط هم الذين يزرعون بذور التفاح لانتاج أشجار التفاح وهم لا يقومون بتربية البادرات لمجرد الحصول منها على الثمار، وإنما لإنتاج مجموع جذري قوي وبعد سنة من النمو يتم استئصال الجزء الهوائي من جسم النبات ويؤخذ فرع (الطعم Scion) من شجرة بالغة من الصنف المرغوب فيه ويغرس في شق في الجذع المقطوع (الأصل stock) (الشكل ١٦-١٥). طالما كانت أنسجة الكامبيوم Cambium من الطعم والأصل متحدة وتم اتخاذ الاحتياطيات الواجبة لمنع العدوي والجفاف فإن الطعم سوف ينمو ويحصل على كل احتياجاته من الماء والأملاح المعدنية من خلال المجموع الجذري للأصل. ومع ذلك فإن الثمرة التي سوف تنتج في نهاية الأمر سوف تكون مماثلة تماماً (على فرض أنها أنتجت تحت ظروف بيئية مشابهة) للثمار الناتجة من الأشجار التي أخذنا منها الطعم.

الحاجة الى تحديد الظروف البيئية المتشابهة تتضح بجلاء في صناعة النبيذ. فمعظم مزارع العنب الفرنسية تزرع أعناب يتم اكثارها خضريا من أعناب ولاية كالفورنيا ومع ذلك فان أعناب فرنسا (والنبيذ الناتج منها) تختلف بعض الشيء عن تلك الموجودة في كالفورنيا.

صنف ماكنتوش من التفاح هو واحد من أصناف عديدة شائعة تزرع في الولايات المتحدة وكندا، وقد وجدت أول شجرة منذ أكثر من ١٥٠ عاماً نامية في مزرعة جون ماكنتوش في أونتاريو بكندا وكانت قد نمت من بذرة، وقد أحست زوجة ابن ماكنتوش

بالصفات المرغوبة لثمار هذه الشجرة. أكثر من ذلك فإنها كانت تعلم أنه لا فائدة من محاولة الحصول على أشجار جديدة من نفس الصنف عن طريق البذور الموجودة في ثمار هذه الشجرة بالذات فالبذور تنتج من التكاثر الجنسي الذي لابد فيه من مشاركة أبوين وبينما شجرة ماكنتوش سوف تكون أحد هذين الأبوين فإن الأب الآخر ربما كان شجرة أخرى تنمو في نفس المنطقة وسوف تظهر على الذرية صفات من الأبوين وربما أدى ذلك الى إنتـاج تفـاح أفضـل وربـما أدى الى تفاح أسوأ. الطريقة الوحيدة لاكثار شجرة ماكنتوش وجعلها متاحة لمربي التفاح الآخرين هي طريقة التكاثر اللاجنسي. الطعوم المأخوذة من الشجرة الأصلية والمطعمة على أصول من أي شجرة تفاح أخرى سوف تنتج تفاحاً من نفس صنف الماكنتوش. كل واحدة من مئات الآلاف من أشجار التفاح من صنف الماكنتوش المزروعة الآن انحدرت عن طعم مأخوذ من تلك الشجرة الأولى. أو بعبـارة أخـرى فـإن كل هذه الأشجـار تشكل مجموعـة متماثلـة clone حيث أنها جميعاً تشترك في نفس التركيب الوراثي لأنها جميعاً نشأت من الانقسامات المتوالية لخلايا تلك الشجرة الأولى.

في كل أنواع التكاثر اللاجنسي تكون الذرية مماثلة للأب من كل النواحي طالما تمت تربيتها تحت ظروف بيئية مشابهة للظروف التي عاش فيها الأب. إذا كان النوع النباتي



الشكـل ١٦-١٥. اكثـار أشجـار التفاح لاجنسيا بالتطعيم. قطعة من ساق (الطعم) من الصنف المرغوب يتم غرسهـا في شق يقـطع في جذع الأصـل. الثمرة التي تنتج في النهاية سوف يكون فيها كل ميزات الصنف الذي أخذنا منه الطعم وليس الصنف الذي أمدنا بالأصل.

ناجحاً في موطنه فإن أي تغير متوارث في الذرية يكون ضارا. التكاثر اللاجنسي هو وسيلة لإنجاب أفراد جدد قد لا يبدو عليهم مثل هذا التغير ولذا فهو يميل الى المحافظة على الأمر الواقع. ومع ذلك إذا حدث تغير في الظروف البيئية فإن التمسك بالأمر الواقع قد يؤدي إلى الفناء. الطريق الوحيد الذي يمكن الاعتماد عليه للتطور في مواجهة الظروف البيئية المتغيرة هو إعادة ترتيب الجينات التي يحققها التكاثر الجنسي. ليس من المستغرب إذن أن تكون غالبية الأنواع النباتية قادرة على التكاثر بالطريقتين الجنسية واللاجنسية كي تستطيع البقاء في مواجهة الظروف البيئية التي تكون ثابتة في بعض الأوقات ومتغيرة في أوقات أخرى.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

التبـاين بين الانقسـام الاختـزالي والأخصاب يقسم دورة حياة النباتات إلى طور مشيجي أحادي العدد الكروموسومي وطور جرثومي. وبسبب عدم قدرة النباتات على الحركة يكون لديها مشاكل يجب حلها حتى تتمكن من إتمام التكاثر الجنسي. من هذه المشاكل: (١) نقل الأمشاج المذكرة الى الأمشاج المؤنثة بطريقة تحميها من الجفاف، (٢) إنتشار الذرية في بيئات ومواطن جديدة.

الأزهـار هي وسيلة التكـاثـر الجنسي في كاسيات البذور. حبوب اللقاح المقاومة للتجفيف يتم انتاجها في الأسدية وتحملها من زهرة الى أخرى عوامل مختلفة مثل الرياح والحيونات (مثل الحشرات، الطيور، الخفافيش). يتم تكوين المني، ويحدث الأخصاب في الأنسجة الرطبة للمتاع، أما تكوين الزيجوت فإنه يبدأ طورا جرثوميا جديدا.

يواصل الزيجوت النمو حتى تتكون البذرة، ينمو جدار المبيض (ومعه أحياناً أجزاء زهرية أخرى) ليعطي ثمرة. الثمار هي تحورات تساعد في انتشار محتوياتها من البذور الى أماكن جديدة، كذلك فهي تحقق الانتشار بعدة طرق منها:

(١) طرق آلية وذلك بطرد محتوياتها من البذور
(٢) استغلال الرياح وتيارات الماء لحمل البذور الى أماكن جديدة
(٣) الاستفادة من الحيوانات في توزيع البذور.

الكثير من النباتات تستطيع أن تتكاثر بطرق لاجنسية، و الذرية الناتجة من التكاثر

اللاجنسي تكون مشابهة وراثياً (اذ استبعدنا الطفرات) للآباء ولذلك تكون مجموعات متـماثلة. النبـاتـات التي توجـد بها صفات مرغوبة لابد من اكثارها بواسطة التكاثر اللاجنسي، حتى نضمن المحافظة على هذه الصفات.

تمـارين ومسـائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ أين تقع الحوافظ الجرثومية في كل من:
(أ) الحزازيات، (ب) السرخسيات،
(ج) الصنوبر، (د) شجرة التفاح؟

٢ ــ ماهي أوجه التشابه بين الأطوار المشيجية للحزازيات والسرخيات وكاسيات البذور؟
٣ ــ ماهي أوجه الاختلاف بينهم؟
٤ ــ ماهي أوجه التشابه بين الأطوار الجرثومية للحزازيات والسرخسيات وكاسيات البذور؟
٥ ــ ماهي التحورات التي تجعل الحزازيات مهيأه جيداً للحياة على الأرض؟ وما هي نواحي القصور التي تجعلها غير مهيأة لذلك؟
٦ ــ ماهي الشروط الثلاثة التي لابد من توفرها دائماً حتى يحدث إنبات البذور؟
٧ ــ ماهي العوامل الاضافية التي تكون ضرورية أحياناً لإنبات البذور؟
٨ ــ صف الطريقة العملية التي يمكنك استخدامها للكشف عن حيوية البذور في الفول بعد تخزينها لمدة خمس سنوات.
٩ ــ صف التجربة المستخدمة في تحديد درجة الحرارة المثلى لانبات بذور الفول.
١٠ ــ ماهو النسيج النباتي الذي يكون عادة ثلاثي العدد الكروموسومي؟
١١ ــ ماهي الخلايا التي يحدث بها انقسام اختزالي في كل من:
(أ) الحزازيات، (ب) الفول؟
١٢ ــ التكاثر الذي يحدث في الأزهار المغلقة لنبات البنفسج (أنظر الشكل ١٦-٨) هو تكاثر جنسي لأنه يتضمن اتحاد مشيجين. فهل يحقق ما يحققه التكاثر الجنسي في الأزهار المفتوحة ؟ ماهي العواقب طويلة المدى إذا ما اقتصر التكاثر في نبات

البنفسج على الأزهار المغلقة فقط؟

REFERENCES المراجع

1. WATSON, E.V. Mosses, Oxford Biology Readers, No. 29, Oxford University press, Oxford, 1972.
2. RAVEN, P. H., R. F. EVERT, and HELENA CURTIS, Biology of plants. 2nd ed., Worth, New York,1976. A beutifully illustrated botan text with details of the reproductive methods of representatives of each of the major plant groups.
3. GRANT,V., "The Fertilization of Flowers", Scientific American, Offprint, No. 12, June, 1951.
4. BAILE, J. B. The Ripening of Fruit, Scientific American, Offprint No. 118, May, 1954.
5. KOLIER, D., Germination, Scientific American, Offprint No. 117, April, 1959.

CHAPTER 17 الباب السابع عشر

التكاثر في الحيوانات
REPRODUCTION IN ANIMALS

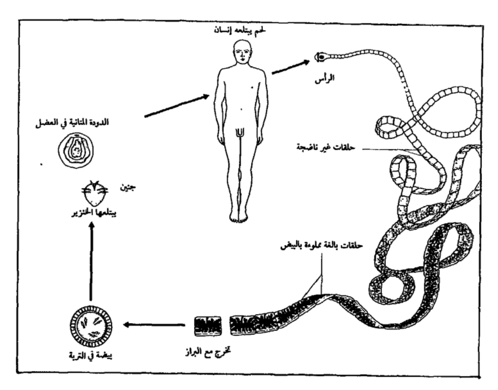
الباب السابع عشر
التكاثر في الحيوانات

١٧-١ . التكاثر اللاجنسي في الحيوانات:
ASEXUAL REPRODUCTION IN ANIMALS

توجد طرق التكاثر اللاجنسي بقلة في الحيوانات ، أقل منها بكثير عما في النباتات. فبعض الديدان الصغيرة تتكاثر بطريقة الأنشقاق (Fragmentation) فبعد نمو الدودة الى حجمها الطبيعي تتكسر الى ثماني أو تسع قطع ، كل قطعة منها الى دودة بالغة ثم تتكرر هذه الطريقة.

كما يوجد عدد من الحيوانات تتكاثر بطريقة التبرعم (Budding) و يكبر البرعم وهو ينمو على جسم الأبوين وفي بعض الأنواع ، كما في سمك الجيلي، تنفصل البراعم بعيدا عن الأبوين وتعيش حياتها المستقلة. وفي أنواع أخرى كما في المرجان (Corals) تبقي البراعم ملتصقة بالأبوين وتعطي عملية التكاثر هذه مستعمرات حيوانية.

والتكاثر بالتبرعم صفة منتشرة في الحيوانات المتطفلة، الدودة الشريطية أوضح نموذج على ذلك. فلحم الخنزير الذي لم يتم طبخة جيدا يحوي الديدان المثانية -Blad der Worms لدودة الخنزير الشريطية تينيا سوليم *Taenia solium* تتكون كل من الديدان المثانية من حافظة (Capsule) تحتوي على رأس (Scolex) (الشكل ١٧-١). وعند ابتلاع تلك الدودة المثانية يذيب العصير المعوي جدار الكبسولة في المعدة، ثم تدفع الرأس نفسها من الداخل للخارج وتثبت نفسها بواسطة ممصات وخطاطيف بجدار الأمعاء، ثم تكون تلك الرأس بعد ذلك براعم [Proglottids-



الشكــل ١٧-١ . دورة حياة دودة الخنزير الشريطية *Taenia solium*. التكاثر اللاجنسي للحلقات بالرأس قد ينتج سلسلة طولها ٦ أمتار (١٢ قدم) تحتوي على أكثر من ١٠٠ حلقة، كل حلقة يمكن اعتبارها فردا منفصلا . الحلقات تعيد التكاثر جنسيا .

بروجلوتيدات] وهي الحلقات في طرفها الخلفي مع بقاء تلك البروجلوتيدات متصلة مع بعضها البعض، بعد نضج تلك البروجلوتيدات تنمو لها أعضاء التناسل الجنسية .

وتنفصل اكثر بروجلوتيـــدة نضجا بعد ذلك وتخرج مع البراز، وقبل حدوث هذا الأنفصال قد يصل طول سلسلة البروجلوتيدات نحو ٢٠ قدما وتحتوي تلك السلسلة على أكثـر من ١٠٠٠ بروجلوتيدة. ومع وجود جهاز عصبي مضمحل وكذلك جهاز عضلي وجهاز إخراجي تشترك فيها جميع البروجلوتيدات، إلا أن كل بروجلوتيدة يمكن اعتبارها كائن منفصل .

وبعـض الأنـواع القليلــة من الحيوانـات الراقيــة لها طريقــة تكاثر لاجنسيــة تدعـو الـى العجـب تسمـى بطريقــة التــوالـد البكـــري (Parthenogenesis). فالأنـاث تنتـج بيضا يفقس وتخرج منه الصغار بدون تلقيح بواسطة الذكر. ويحدث التـوالـد البكـري في بعض الأسماك، أنـواع كثـيرة من الحشرات، قليل من أنواع

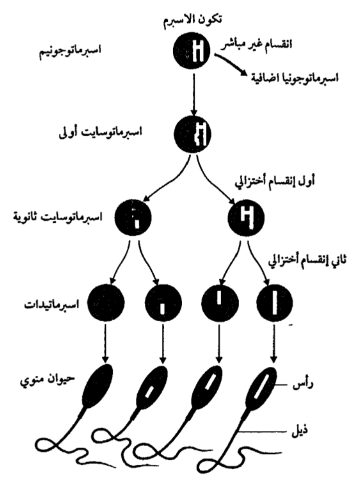
السحالي. وفي حالات قليلة، نجد أن التوالد البكري هو الوسيلة الوحيدة التي يتكاثر بها النوع، لكن في أغلب الحالات، تضطر الحيوانات الى التكاثر بكريا في أوقات معينة فقط. فمثلا حشرة المن (Aphid) تتكاثر بكريا في الربيع عندما تجد نفسها محاطة بوفرة من الغذاء، حيث أن التكاثر البكري أسرع بكثير من التوالد الجنسي واستخدام طريقة التوالد البكري هذه تيسر للحشرة إنتاج أفراد وفيرة لاستغلال هذه الوفرة من الغذاء. ولربما كانت وظائف كل طرق التكاثر اللاجنسي هو تشجيع بناء المستعمرات وإستغلال البيئة الحيوانية.

وفي بعض الأحيان نجـد أن التكاثر اللاجنسي يحدث بالتبادل مع، وليس بديلا عن، التكاثر الجنسي. وكما في النباتات، فالتكاثر الجنسي يعتبر طريقة هامة لحدوث أي جينات جديدة، وبمرور الوقت فإن توارث الأختلافات الجينية في التكاثر الجنسي تمكن النوع من الملاءمة السريعة للتغيرات التي تحدث في البيئة، أي أن النوع يتطور.

١٧-٢ . تكوين الجاميطات : THE FORMATION OF GAMETES

الحيوانـات ليست كالنبـاتـات، لاتنتج أجيالا ثنائية الكروموسومات (Diploid) ، وحيدة الكـرومـوسـومـات (Haploid) بالتبـادل، فالأخصـاب يسبقـه دائما الأنقسام الأختزالي (Meiosis) ، لكن نواتج هذا الأنقسام الأختزالي هي الجاميطات نفسها. وفي جميع الحيوانات تنتج جاميطات مختلفة غير متشابهة ولكن يمكنها تأدية وظيفتها فأن أحد تلك الجـاميطات يكون متحركا (الحيوان المنوي Sperm) ليتقابل مع الجاميط الأخر الثابت (البويضة Egg) ويحدث التلقيح ويتكون الجنين.

وللخلية المنوية أي الحيوان المنوي ذيل، كما يحتوي جسم الحيوان على نـواه وتنتـج الحـيـوانـات المـنـويـة داخـل الخـصـى (Testes) بواسـطة خلايا خاصـة تسـمى سبرماتوجونيا (Spermatogonia) وهي ثنائية الكروموسومات. وتنقسم الأسبرماتوجونيا هذه أنقساما غير مباشر (Mitosis) لأعطاء المزيد من الأسبرماتوجونيات أو ربما تتحـول الى سبرمـاتـوسـايتـات (Spermatocytes) والأنقسـام الأختـزالي (Meiosis) لكـل إسـرمـاتـوسـايت يعـطـي أربعـة خلايـا وحيـدة الكـروموسومات (Haploid) تسمى اسبرماتيدات (Spermatids) (الشكل ١٧-٢) وهذه تصبح فيما بعد خلايا منوية بعد أن تفقد غالبية السيتوبلازم أثناء عملية التحول هذه.



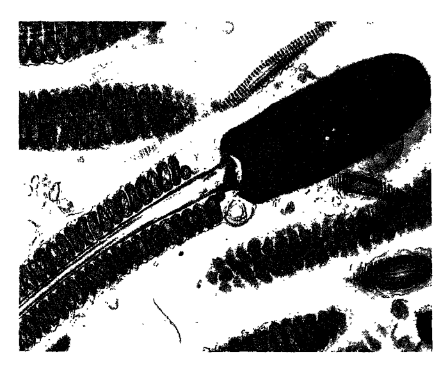
الشكـل ١٧-٢. تكـوين الحيـوان المنـوي لأجـل التبسيط، يشـاهـد سلوك زوج واحـد من الكـروموسومات المتجانسة (أنـظر شكـل ٩-٩). وبـزوجين أو أكثر، الترتيب العشـوائي للمتجـانسـات تسـاهم في تنـوع الاتحادات الجينية في الجاميطات.

وتتكون الخلية المنوية من: (١) رأس تحتوي على الكروموسومات في حالة كتلة غير فعالة، (٢) جسمين مركزيين (Centrioles) (٣) ذيل. ويعمل أحد الجسمين المركزيين كقـاعـدة للسـوط (Flagellum) الذي يمتد بطول الذيل. وتحيط الميتوكوندريا بالجزء العلوي من السوط وتعطي الطاقة اللازمة لحركة السوط الوامضة (الشكل ١٧-٣).

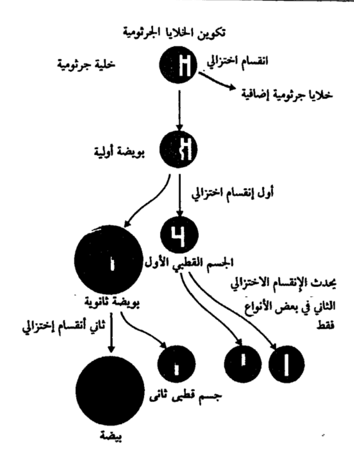
ينـتـج البيـض من المبـايض (Ovaries) وتنقسم الخـلايا الجـرثـومية الثنـائية الكروموسـومات المسماه أو أوجونيا (Oogonia) انقساما غير مباشر لتعطي خلايا جرثومية إضافية (الشكل ١٧-٤) ويحدث هذا مرة واحدة كل عام في معظم الحيوانات المائية والـبرمائيات، أما في الزواحف والطيور والثدييات فتتوقف تلك العملية الأخيرة قبل الـولادة بمـدة طويلة. وفي الحقيقـة فأنه بمجرد بلوغ الجنين داخل الأم في الأنسان أسبوعه الخامس عشر تكون مرحلة تكاثر الأوأوجونيات قد أكتملت، يؤيد هذا نظرية

وايزمان (Weismann) القائلة بالأنعزال المبكر لبلازما الخلايا التناسلية عن بلازما الخلايا الجسمية.

ويبـدأ تكـوين البـويضـة عنـدمـا تبـدأ خليـة الأووجـونيا (Oogonia) في النمـو وتتحـول الى بويضـات أولية تسمى أو أوسايتات (Oocytes) (الشكل ١٧-٤)، تدخل هذه الخـلايا الثنـائيـة الكـروموسومات في المرحلة التحضيرية (Prophase) للأنقسام الأختزالي الى حيث يقف نموها عند هذا الحد. ولا يحدث أي نمو لخلايا الأوأوسايتات الا قبل استعداد الحيوان للدخول في النشاط التكاثري. ويحدث هذا في الضفادع مرة واحدة في السنة - عادة في الربيع - بعد بلوغ الطور البالغ، تبدأ بعد ذلك ألاف من البـويضـات (Oocytes) مرحلة نمـو واضحـة في الخلايا. وتحاط كل خلية من تلك البويضـات بمجموعـة مـن الخلايا تسمى فوليكل (Follicle) وتنتقل المواد الغذائية من خلايا الفوليكل الى البويضة النامية ويزداد حجم بيض الضفدعة اثناء هذه الفترة اكثر من مليون مرة.



شكـل ١٧-٣. خليـة حيـوان منوي في خفـاش (كـبر ١٢,٠٠٠ مرة). لاحظ الترتيب المنظم للميتوكوندريا في الذيل. وهي تمد الحيوان بالطاقة اللازمة لحركته.
(بتصريح من دون و. فاوست، سوسومورايتو).

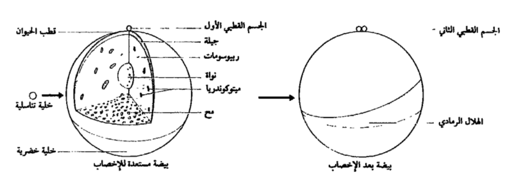


الشكـــل ١٧-٤. تكـوين البـيـضــة. ماهـي الكـروموسومات التي تنتهي في البيضــة، ومــاهي التي تنتهي في الأجسام القطبية كلها محض للصدفة.

وعند انتهاء هذا الطور من النمو، تكون خلية البيضة عبارة عن كرة كبيرة تحتوي في سيتوبلازمها على كميات كبيـرة من (DNA) و (RNA) ومح و ميتوكوندريا وحبيبات زيتية ولا تتـوزع المـواد المذكـورة بأنتـظام في بيضـة الضفدعـة بل فـي كميـات متدرجـة ابتـداء من قطب الـى قطب . فالنصـف الغــامـق من البيضـة يحـده مـن أعلـى القطـب الحيوانـي (Animal pole) وبخلاف المح ، فأن أغلب محتويات البيضة تتركز قرب هذا القطب، كما توجد النواه أيضا في هذا الجزء ويزداد تركيز المح جهة الطرف المضاد وهو الطرف الفاتح لونا والذي يسمى بالقطب الخضـري (Vegetal pole).

وبقرب إنتهاء نمو البويضة الأولية يكون قد اكتمل أيضا أول أنقسام أختزالي ، ولا يتـوزع السيتـوبلازم بالتساوي بين الخليتين الناتجتين بل يذهب أكثره الى إحداهما، تسمى الخلية الأخرى بالجسم القطبي (Polar body) (الشكل ١٧-٦) .

وفي معظم الفقاريات يستمر الأنقسام الأختزالي الثاني حتى طور المرحلة الأنتقالية



شكل ١٧-٥. نمو بيضة ضفدعة. دخول خلية الاسبرم يتبعة اعادة تنظيم المواد السيتوبلازمية في الهلال الرمادي ثم بعد ذلك اكتمال الانقسام الاختزالي الثاني.

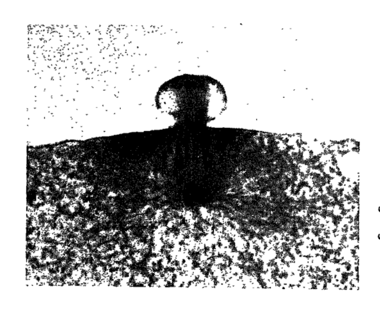
(Metaphase) ثم يتوقف عند ذلك، تكون البويضة عندئذ مستعدة للنزول من خلايا الفوليكل، يطلق على هذه العملية بالتبويض (Ovulation) وتتشقق خلايا الفوليكل وجدر المبيض لتسمح للبويضة للمرور الى فراغ الجسم ثم تدخل البويضة في قناة المبيض حيث تضاف اليها مواد إضافية، مثل حلقات الألبيومين الجيلاتينية في الضفدعة، تنتظر البويضة بعد ذلك عملية الأخصاب.

ويقاس عمر الحيوان المنوي والبيضة اللذين تم نزولهما عادة بالساعات. والمسافة التي يستطيع الحيوان المنوي سباحتها محدودة، لذلك يضع الذكر حيواناته المنوية بالقرب من البيضة (أو البيض) حيث أن الذكور نفسها (وكذلك الأناث بطبيعة الحال) قادرة على الحركة. ولابد من توافر المحيط الرطب لضمان تحرك الحيوان وبالتالي إخصاب البيضة.

١٧-٣. إحضار الجاميطات سويا:

BRINGING THE GAMETES TOGETHER

لا توجد أية مشكلة في توفر المحيط الرطب عند الحيوانات المائية لحدوث الأخصاب، إذ أن الأخصاب يحدث مباشرة في الماء بعد نزول الجاميطات من الأبوين. ولضمان تقابل الجاميطات المذكرة مع المؤنثة فغالبا ما توضع تلك الجاميطات قريبة من بعضها البعض. كما يتطلب هذا كذلك بلوغ النضوج الجنسي لكلا الجنسين الذكور والأناث في نفس الوقت تقريبا وفي نفس المكان. ولبعض الحيوانات سلوك دوري خاص بخصوص عملية التناسل، ففي سمك كاليفورنيا جرانيون يسبح الجنسان في



شكـل ١٧-٦. تكـون الجسم القـطبي أثناء تكوين البيضـة في الذبابة البيضاء. (بتصريح من تيرتوكس).

مياه ضحلة للتخلص من جاميطاتها مرة عند أكتمال القمر ومرة أخرى عند أوائل ظهور القمر. وفي أنواع أخرى يقوم أحد الجنسين فقط (وهو عادة الذكر) ببعض الأنشطة السلوكية المعينة (الغزل) في حضور الجنس الأخر (الأنثى)، تعمل هذه الأنشطة كزناد يؤدي الى وضع البيض في الأنثى.

وربما كانت أول الحيوانات الأرضية هي العقارب والحشرات. ولقد خلقت هذه المعيشة الأرضية مشاكل أمام تقابل الجاميطات مع بعضها البعض وحمايتها في نفس الوقت من الجفاف بالهواء، وكان الأخصاب الداخلي هو الحل الوحيد لذلك، فالقضيب في الذكر يدخل في فتحة الأنثى التناسلية أثناء عملية التلقيح (الجماع) (Copulation) لنقل الحيوانات المنوية الى الأنثى. وفي الحشرات تخزن الحيوانات المنوية داخل الأنثى في القابلة المنوية لحين أستعداد الأنثى لوضع البيض، عند نزول هذا البيض في قنوات المبيض يتم أخصابها بالحيوانات المنوية (الشكل ١٧-٧).

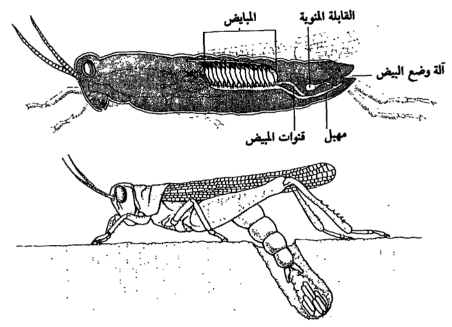
وأول الفقاريات التي وجدت على اليابسة كانت الحيوانات البرمائية (Amphibians)، كما يدل الأسم فأن تلك الحيوانات هي في الحقيقة نصف أرضية. فمعظم الضفادع لابد لها من الرجوع الى الماء للتزاوج كما يحدث الأخصاب في الماء. وفي نوع الضفادع المعروف بأسم Bullfrog على سبيل المثال يحتضن الذكر الأنثى بطريقة يطلق عليها أسم أمبلكسس (Amplexus) ، عند وضع الأنثى لآف البيض في الماء يضع الذكر فوقها

حيواناته المنوية، بذلك لايحدث تلقيح .

وكانت الزواحف أول فقاريات حقيقية تعيش في بيئة أرضية حقيقية، لذلك زودت بخواص فسيولوجية وتشريحية (مورفولوجية) تسمح لها بالعيش في الأجواء الحارة الجافة . وبالنسبة الى تكاثرها الجنسي فلقد تغلبت تلك الزواحف على نقص الرطوبة اللازمة للجاميطات بالأخصاب الداخلي، ففي أغلب الحالات يتزاوج الذكر مع الأنثى لدفع حيواناته المنوية مباشرة في داخل فتحتها التناسلية. وتغلبت الطيور والثدييات كذلك على مشكلة أخصـاب الجـاميطات سويا في وسط رطب بعملية التلقيح التي يعقبهـا الأخصاب الداخلي.

١٧-٤ . الأخصاب: FERTILIZATION

تبدأ عملية الأخصاب عند لمس الحيوان المنوي للبويضة، إذ عندئذ تفرز الحيوانات المنوية إفرازات هاضمة لأذابة مكان ثقب في طبقات قشرة البيضة البروتينية وكذلك-في بعض الأنـواع - في خلايا الفوليكل التي تحيط غالبا بالبيضة. وعند دخول الحيوان المنـوي داخـل البيضة، تقوم الأخيرة بدورها وذلك بسحبها الحيوان المنوي للداخل



شكـل ١٧-٧. أعضـاء التناسل في أنثى النطاط. الحيوانات المنوية تخزن في قابلات منوية بعد التلقيح بواسطة الذكر. يحدث الإخصاب عند مرور البيض خلال المهبل قبل وضعه في التربة.

وبحـدوث تحولات سريعـة دراماتيكية داخل البيضة نفسها، فتعيد محتويات البيضة السيتوبلازمية ترتيب نفسها. وتوجد فـي الضفـدعـة حبيبـات سيتوبلازميـة خاصـة تظهـر على سطح البيضـة مكـونة شريطا يسمى بالهلال الرمادي (Gray Crescent) (الشكل ١٧-٥)

وفي كثـير من البيض، يمنع دخول حيوان منوي واحد داخل البيضة دخول أي حيوان آخر، لكن هذا لا يحدث في البيض الكبير الحجم مثل بيض الزواحف والطيور، في تلك الحالة ولو أن العديد من الحيوانات المنوية تنجح في الدخول الى داخل البيضة إلا أن حيوانا منويا واحدا فقط هو الذي تشترك نواته في تكوين زيجوت المستقبل. وعلى أية حال فأن دخول الحيوان المنوي يعمل كشرارة لتكملة الأنقسام الأختزالي الثاني وتكوين جسم قطبي ثاني أيضا.

وتعتـبر أخـر مرحلة في عملية الأخصـاب هي في كبر حجم رأس الحيوان المنوي لتكوين نواه أولية (Pronucleus) تهاجر بدورها الى مثيلتها في البيضة، وبألتحام النواتين تتكون نواه زيجوت ثنائية الكروموسومات وعندئذ يكتمل الأخصاب. وبعد ذلك بوقت قصير تقوم خلية الزيجوت هذه بأول أنقسام غير مباشر وتبدأ عملية تكوين الجنين.

١٧-٥ . العناية بالصغار CARE OF THE YOUNG

توجد علاقة هامة بين عدد الجاميطات، وخاصة البيض، الذي تنتجه الثدييات المختلفة وبين العناية التي تعطي للجنين أثناء النمو. ولكي يستمر أي تعداد في حجم ثابت لابد من أن يصل فـردان مـن الصغـار الـى البلـوغ لـكل زوج من الأبـاء. والقليـل جـدا مـن الحيوانـات المائيـة تعتنـي ببيضهـا بعد إخصابـه وبـذلك تكـون نسبـة المـوت بين الصغـار عالية جدا. ولتعـويض هذا الفقد يمكن للأنثى البالغة للحيـوان المائي القشري *Crasostrea virginica* (الأويستر الأمريكي) أن تبيض أكثر من مليون بيضة في الموسم الواحد. والفرصة الموجودة لبلوغ حيوان صغير ناتج من بيضة واحدة من بيض هذا الأويستر الأمريكي الى الطور البالغ صغيرة جدا، إذ أنه حتى عند نجـاح الأخصـاب فأن الصغـار تتعـرض أثنـاء أحدى فترات نموها للهلاك بواسطة الفـيروسات أو الأصابة بالأمراض أو بأية حوادث أخرى. وتعطي بعض الحيوانات المائية، كما في القواقع ذات المصراعين التي تعيش في المياه العذبة وبعض الأسماك بعض

العناية لبيضها. فبلح البحر (Clam) الذي يعيش في المياه مثلا يحتفظ ببيضه المخصب في خياشيمة الى أن يحين الفقس، كما يبنى أحد أنواع الأسماك المسمى (Stickleback) عشا يقوم بحراسته وتهوية البيض الموجود بداخله، والغريب أن مثل تلك الأنواع التي تعتني بصغارها تضع أعدادا قليلة من البيض.

وبيض معظم الحيوانات المائية صغير الحجم، في عدد كبير من الأنواع لا يشبه الصغير الذي يفقس من البيضة الحيوان البالغ بل يكون على صورة يرقة تختلف كليه في الشكل عن الأبوين، تسبح تلك اليرقات حرة في الماء وتتغذى على الكائنات النباتية والحيوانية الـدقيقـة المعـروفة باسم بلانكتون (plankton). ويحدث بعد فترة من النمو تطور في تلك اليرقات ويتغير تركيب جسمها الى الطور البالغ. وقد يحدث التطور على مراحل عدة (كما في القشريات والرخويات) أو على مرة واحدة (كما في سمك النجمة).

وتحتاج جميع الحيوانات الأرضية الى بعض الوسائل التي تحمى بها صنفها من الجفاف بواسطة التيارات الهوائية. ففي الحشرات تكون هذه الحماية على شكل غلاف غير منفذ للماء يحيط بالبيضـة، في بعض الحـالات، تكون الحماية على هيئة كبسولة أو حافظة تضعها الأنثى حول كتلة البيض. ويختلف عدد البيض الملقح الموضوع في كل فصل من الفصول من مئات الى ألاف تبعا لنوع الحشرة وتبعا لمقدار العناية التي ينالها البيض. ويكـون حظ الأعـداد الصغـيرة في الحيوانـات الأرضية أكبر عما في الحيوانات المائية للوصول الى طور البلوغ. وتبلغ العناية بالصغار أوجهـا في مستعمرات النمل والنحل والتي تصـل نسبة كبيرة من البيض الملقح الى البلوغ. من الواضح أن أغلب صغار النمل والنحل ماهي ألا شغالات عقيمة تعمل على سهولة وجود تعداد ثابت لتلك الحشرات. ولا تعتنى أغلب البرمائيات المعروفة ببيضهـا، أذ أنه بعد الأخصاب يترك البيض ببسـاطـة لينمو في الماء، وتقوم الطبقات الجيلاتينية من الألبيومين التي تحيط بالبيض بأمتصاص الماء مما يجعلها تنتفخ مكونة حماية طبيعية لهذا البيض، كما تساعد تلك الـطبقات الجيلاتينية في حفظ البيض في درجة حرارة أدفأ من الماء المحيط به. ويكـون الجيلاتين المحيط بالبيض شفافا ومنفذا لأشعة الشمس التي تمتصها الطبقة الغامقة الموجودة بالسطح العلوي للبيض النامي، تتحول تلك الطاقة الضعيفة الناتجة عن أشعة الشمس الى حرارة تدفيء الجنين. والطبقة الجيلاتينية هي في نفس الوقت حافظة للحرارة مما يجعل الطاقة المشعة من الجنين أقل من الطاقة التي استقبلها هذا

الجنين، تلك الظاهرة الطبيعية واضحة لكل أنسان يدخل السيارة الواقفة في الشمس لبعض الوقت ونوافذها مغلقة.

وتعمل الطبقة السطحية العلوية للبيضة المخصبة كذلك كحماية لونية، إذ يصعب تمييز البيضـة من أعـلى عن قاع المستنقـع المائي الغامق المحيط بالبيضة، كما يتشابه السطح السفلي الفاتح للبيضة مع لون السماء إذا ما شوهدت تلك البيضة من أسفل.

ويتم إخصاب بيض الزواحف في القنوات التناسلية للأنثى، ثم تحاط البيضة أثناء نزولها من قناة المبيض بقشرة غير منفذة للماء، هذا يجعل الجنين محاطا بمنطقة رطبة بعد وضع البيضة. وفي أغلب الأنواع يدفن البيض في أماكن دافئة ثم تهجره الأم، وعند فقس البيضـة المملوءة بكمية كافية من المـح يخرج حيوان صغـير يشبة الأبوين تماما ومعتمدا على نفسه.

وفي زواحف أخرى، كبعض أنواع الثعابين، يحفظ البيض داخل جسم الأم الى أن يفقس، وتكون تغذية الجنين في هذه الأثناء أساسا عن طريق المح وليس عن طريق أنسجة الأم.

وبعد أن ظهرت الزواحف على سطح الأرض بقليل، رجعت ثانية بعض الأنواع الى المعيشة في بيئة مائية، اليوم نجد أن نوعا واحدا من السحالي (إجوانا المائية) وبعض الثعابين والسلاحف والتماسيح المختلفة تقضى معظم حياتها في الماء. وعموما فالأنواع المائية السابق ذكرها لابد لها من العودة لليابسة لوضع البيض.

وتضع السلحفـاه المسماه (Loggerhead) نحو ٤٠٠ بيضة في الموسم الواحد ولو أن هذا البيض يترك بدون رعاية الأبوين، لكن نسبة الوفاة في الصغار الفاقسة قليلة جدا مما يحفظ التعداد الأصلي للسلحفاة على ماهو عليه. وتعتبر بعض الزواحف من أكبر الحيوانات المعمرة على وجه الأرض، مما يتيح لأنثى سلحفاه معمرة الحفاظ على تعداد النوع.

ويمكن للطيور كذلك المعيشة في أماكن جافة. وكما في زواحف كثيرة (والتي نشأت منها) تضع الطيور بيضا ذو قشرة. وكثيرا ما يعتني الأبوان بالبيض الغني بالمح والذي عنـد فقسـه يخرج الطير الصغير حاملا أغلب صفات الكبار، تستمر الأباء في رعاية

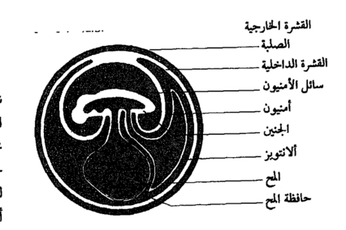
صغارها الى أن تستطيع الأخيرة العناية بأنفسها. ونادرا ما تضع الطيور أكثر من ٢٠ بيضة في الموسم الواحد والمتوسط في الغالب هو أقرب الى الأربعة بيضات. وإحاطة البيضة بقشرة تناسب ظروف معيشة جنين الطيور والزواحف لتنمو بعيدا عن الماء. والفحص القريب لبيضة طائر، لتكن بيضة دجاجة مثلا، يوضح سبب ذلك. فالبيضة نفسهـا تتكـون من كمية كبـيرة من المـح وجـزء صغير جدا من السيتوبلازم. وبعد الأخصـاب، ما زالت البيضة داخل قنوات مبيض الأم، تحاط البيضة بطبقات من الألبيـوميـن المائي (تسمى بيـاض البيضة Egg-white) وقشرة من كربونات الكالسيوم. والقشرة المـذكـورة منفـذة للغازات ولكنها عمليا غير منفذة للماء. وبنمو الجنين من الزيجوت تتكون أربعة أغشية خاصة (الشكل ١٧-٨)، تبقي تلك الأغشية المتكونة والتي نشـأت من الجنـين كجزء منه ولكن فقط أثناء وجوده داخل البيضة، الأغشية الأربعة هي :

١ ـ **محفـظة المـح** (Yolk Sac) وهي التي تحيط بالمـح وتصل الجنين بمصدر غذائه الرئيسي، المح عبارة عن بروتينات وبروتينات ـ دهنية.

٢ ـ **الأمنيون** (Amnion) وينمو حول الجنين محيطا به في فراغ مملوء بالسائل.

٣ ـ **الكوريون** (Chorion) والذي يبطن قشرة البيضة من الداخل ويساعد على تبادل الغازات (أ٢ ، ك أ٢) بين الجنين والهواء الخارجي.

٤ ـ **الكيـس البـولي** (Allantois) والذي يعمل كمخزن لفضلات التمثيل الغذائي (أسـاسـا حمض اليوريك) التي يفـرزها الجنين أثناء النمو. وباستمرارية هذا الكيس البولي في الكبر في الحجم فهو أيضا يساعد في عملية تبادل الغازات.



شكل ١٧-٨. أغشية الكتكوت الـنـاشيء الجنينيـة. لاحظ أن محفـظة المح والألانتويز نموات خارجيـة من القنـاة الهضميـة للجنـين. تنتج نفس الأغشية في أجنة الزواحف والثدييات.

وبتلك الأغفلة الأربعـة يمكن للجنـين النـامي أن يؤدي جميع عمليات التمثيل الغذائي وهو داخل البيضة، كما أن إحاطة الجنين بالسائل الأمنيوتي يحفظه رطبا كما يحفظ جنين السمك في البركة المائية.

وتنشأ تلك الأغشية الأربعة في أجنة الطيور والزواحف والثدييات. وعلى العموم ففـي الثدييـات، بخلاف الأكيدنـاس النادر (Echidnas) وكذلك الحيوان المسمى (Duckbill) (الشكـل ١٧-٩)، لا يوجـد للبيضة قشرة خارجية (Shell). ويبقى بيض الثـدييات الفقـير في المـح داخل القنوات التناسلية بعد الأخصاب، تخترق الأغشية الجنينية جدر رحم تلك الثدييات، بعد نفاذ كمية الغذاء القليلة الموجودة في البيضة يستمر إمداد الجنين داخل البيضة عن طريق الجهاز الدوري للأم.

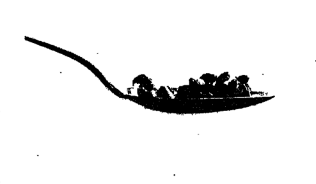
وفـي الحيـوانـات المعروفـة بأسـم مارسوبيالز (Marsupials) (والمعروف منها فقط الحيوانـات التـابعـة لجنس *Opossum* في أمريكا الشمالية) تؤدي محفظة المح الوظيفة الغذائية السابق ذكرها ولكن لفترة محدودة. لذلك فأن صغار هذه الحيوانات تولد في حالة بدائية من النضوج (الشكل ١٧ ـ ١٠) ولكنها تستطيع الزحف في جيب خاص موجود على بطن الأم حيث تتغذى على لبن الأم من حلمات مـزودة بغدد ثديية الى أن تنمو تلك الصغار وتصبح قادرة على تغذية نفسها بنفسها.

وفـي جميـع الثـدييـات الأخـرى تكـون تلـك الأغشيـة الجنيـنيـة مـا يسمـى بالمـشيمـة (Placenta) وحبـل سري (Umbilical cord) تصل الجنين برحم الأم بطريقة





شكـل ١٧-٩. الثـدييـات التـي تضع البيض. حيوان Duckbill *(Platypus)* – الى اليسار ـ يربي صغاره في العش، وآكل النمل الشوكي ـ إلى اليمين يضع صغاره في جيب على بطنه (بتصريح من هيئة الاستعلامات الأسترالية).



شكل ١٧-١٠. Opossums حديثو الولادة. ١٨ منها يمكن وضعها في ملعقة شاي بسهولة. (بتصريح من دكتور كارل ج. هارتمان).

فعالة ويستمر توارد دم الجينين مع دم المشيمة. وبالرغم من إتصال الشعيرات الدموية للمشيمة بمثيلاتها في رحم الأم إلا أنه لا يوجد في الحقيقة مزج بين دم الأم ودم الجنين. وتعمل المشيمة كذلك على امتصاص الغذاء والأكسجين من رحم الأم، بالتالي فأن الفضلات الغذائية (مثل اليوريا) وثاني أكسيد الكربون تنتقل الى الجهاز الدوري للأم لتخرج للخارج عن طريق أجهزة الأخراج في الأم.

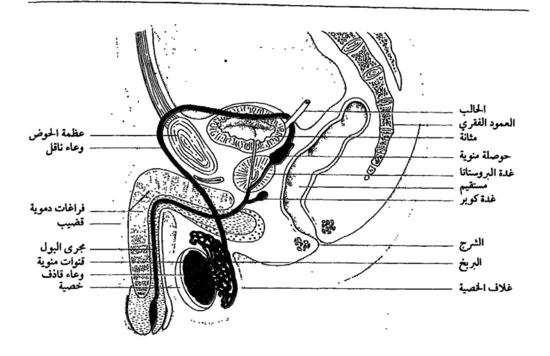
وبالرغم من إستمرارية نمو الجنين داخل رحم الأم لمدة طويلة (على خلاف المعروف في حيوان المارسوبيال) فأنه توجد إختلافات واضحة في قدرة المشيمة في الثدييات على القيام بدورها تجاه الجنين الحديث الولادة. وفي كل الحالات لابد من وجود فترة يتغذى فيها المولود على اللبن الذي تفرزه الغدد الثديية في الأم. وفي بعض الأنواع تمتد رعاية المولود لتشمل تدريبه على النمط السلوكي لتلك الأنواع.

التكاثر في الأنسان: HUMAN REPRODUCTION

١٧-٦. أعضاء الذكر التنناسلية THE SEX ORGANS OF THE MALE

للجهـاز التناسلي في الذكر وظيفتان يقوم بهما: إنتاج الحيوانات المنوية ونقل تلك الحيوانات الى القنوات التناسلية في الأنثى.

تنتج الحيوانـات المنـوية في الخصى Testes (الشكل ١٧-١١)، تمتلىء الخصية



الشكل ١٧-١١ . الأجهزة التناسلية في ذكر الأنسان .

بأنابيب منوية مرتبة بحيث تتقابل نهايتها مع بعضها البعض إذ أنها تزيد في الطول عن ٢٠٠ متر. وتتكون جدر هذه الأنابيب من سبرماتوجونيات ثنائية الكروموسومات وهي أماكن تدفق الحيوانات المنوية فيها بعد. وتنقسم خلايا الأسبرماتوجونيات مرتين على التوالي أنقساما أختزاليا لتتحول الى حيوانات منوية، وبذلك ينتج عن كل اسبرماتوجونيا أربعة حيوانات منوية (الشكل ١٧-٢).

ويصنع ذكر الأنسان البالغ يوميا أكثر من ١٠٠ مليون حيوان منوي، التي تتحرك بالتدريج داخل الأوعية الناقلة التي تصب فيها أنابيب الخصية، ومن الأوعية الناقلة تذهب الحيوانات المنوية الى البربـخ (Epididy mis) وفيه تبلغ الحيوانات المنوية مرحلة أكـبر من النضـوج ثم تخزن في هذا الـبربـخ . ولا توجـد أي خطورة من إجهـاد الأسـبرمـاتـوجـونيات بسبب وفـرة إفـراز الحيوانـات المنـوية . وذلـك لمقـدرة هذه الأسـبرماتوجونيات علـى الأنقسام الغيـر مباشر أيضـا و بذلك يمكنهـا الحفاظ على إفـرازهـا للأعداد الهائلة من تلك الحيوانات المنوية وتعمل الخصية، بجانب إفرازها للحيوانـات المنوية، كغدة صماء تفرز هرمون التستستيرون (Testosterone) وهو هرمون الذكر الرئيسي والمسئول عن نمو الصفات الذكرية الثانوية مثل اللحي والصوت العميق

والتركيب الرجولي للجسم، كما أن هذا الهرمون ضروري أيضا لأفراز الحيوانات المنوية.

ويصنع هرمون التستستيرون في خلايا بينية موجودة بين أنابيب الخصية، الخلايا البينية هذه هي هـدف هرمـون (Luteinizing hormone- LH) الذي يصنع في الفص الأمامي للغدة النخامية الموجودة عند قاعدة المخ. ويوجد هرمون أخر (FSH) تفرزة أيضا الغـدة النخـامية وهـو يؤثـر مباشرة على الأسبرماتوجونيات لتنبيهها لأنتاج الحيوانات المنـوية. وجـدير بالـذكر أن هرمون (LH) هو مسئول مسئولية غير مباشرة عن أنتاج الحيوانات المنوية وذلك لأهمية التستستيرون لتلك العملية.

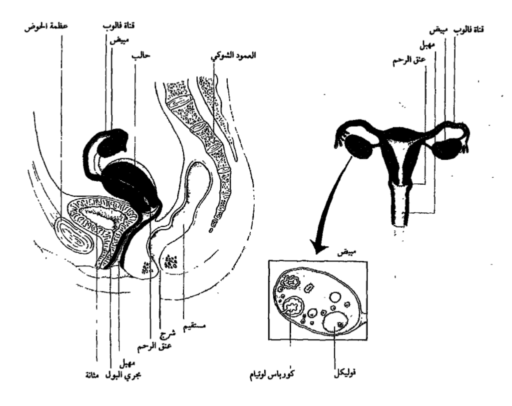
ويتحكم في الغدة النخامية بدورها خلايا عصبية خاصة موجودة في جزء من المخ يسمى هيبوثالاماس (Hypothalamus) والذي يصنع هـرمـونا أو أكثـر مـن الهـرمونـات المفـرزة (Releasing Hormones) وتـذهـب هذه الهـرمونات الأخيرة مباشرة الى الغدة النخامية عن طريق أوعية دقيقة تصل بينهما.

ويفسر لنا وجود تلك الصلة المباشرة بين المخ والهرمونات المرتبطة بالجنس الصلة الوثيقة الموجودة بين النشاط العصبي والسلوك الجنسي. ويتأثر السلوك الجنسي في كثير من ذكور الحيوانات الفقارية بطبيعة الحال بالمؤثرات الخارجية مثل طول اليوم، الروائح التي تفرزها أنثى نفس النوع، مشاهدة الأنثى لمظاهر الغزل التي يؤديها الذكر. ويحس بتلك المؤثرات الخارجية الجهاز العصبي، وتكون النهاية تكاثر الحيوان، كما تقوم تلك المؤثـرات بأحـداث تغـيرات فسيولـوجية في الأجهـزة التنـاسلية ومنهـا إفـراز هرمون التستستيرون. وفي كل تلك التغيرات السابقة تعمل إنزيمات خلايا الهيبوثالاماس على إيجاد رابطة بين جميع أجهزة الجهاز العصبي وبين جهاز الغدد الصماء.

١٧-٧. أجهزة الأنثى التناسلية : THE SEX ORGANS OF THE FEMALE

تعتبر أنثى الفقاريات أهم بكثير من الذكر في إنجاح التكاثر، لذلك فأن فسيولوجيا التكـاثـر في الأنثى أعقـد بكثـير عما في الذكر. ولا تصنع الأنثى خلاياها التناسلية (البيض) فقط، بل إنها كذلك مهيأة للعمليات التالية :

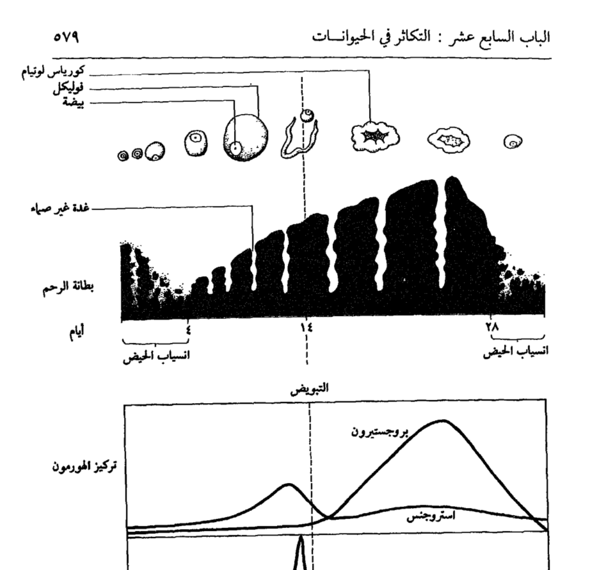
(١) استقبال الحيوانات المنوية من الذكر،



الشكل ١٧-١٢ . الأجهزة التناسلية في أنثى الانسان.

(٢) توفير المناخ المناسب لأتمام عملية الأخصاب،
(٣) تغذية الطفل النامي أثناء الحمل وبعد الولادة.

وينتج البيض داخل المبايض Ovaries (الشكل ١٧-١٢)، تتم خطوات تكوين البيض هذه قبل الولادة. فبمجرد بلوغ الجنين أسبوعه الخامس عشر يكون قد أكتمل تكوين جميع الأوأوجونيات التي تستطيع الأنثى إنتاجها، تدخل مئات الالاف من تلك الخلايا الثنائية الكروموسومات (الأوأوجونيات) في أوائل خطوات تكاثرها الأختزالي ثم تقف عند هذا الحد. ولا يحدث أي نمو بعد ذلك إلا بعد عـدة سنين وذلك عندما تبدأ الفتاة في الدخول في طور النضج الجنسي، عندئذ يبدأ البيض في تكملة نموه، عادة واحدة (أي بيضة) تلو الأخرى ومرة واحدة كل شهر. وتكبر البيضة كثيـرا وتتـم أولـى عمليـات أنقسامهـا الأختـزالي، تحـدث كـل العمليـات داخـل فوليكـل (Fol-licle) وهي خلايا مملوءة بالسائل تحيط بالبيضة. وتعمل الفوليكل الناضجة كذلك كغدة صماء إذ تبدأ خلاياها في إفراز مجموعـة هرمونات تسمى استروجنس (Estrogens) وهي



شكل ١٧-١٣. الأحداث التي تحدث في المبيض (أعلى)، تغيرات في بطانة الرحم (ملون)، تغيرات في مستويات الهورمون في الدم أثناء دورة الحيض.

المسئولة عن نمو الصفات التناسلية الثانوية في المرأة البالغة مثل توسيع الحوض ونمو الصدر، كما تكبر الأجهزة التناسلية وينمو الشعر حول الفتحات التناسلية الخارجية وتحت أباط الأذرع. وينبه الأستروجنس كذلك نمو الأنسجة الدهنية مما يعطي الأستدارة المعروفة لجسم المرأة البالغة.

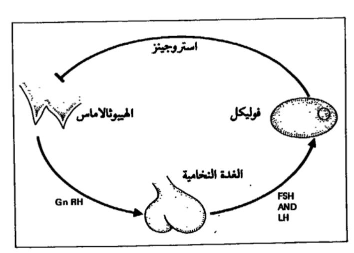
ويستمر إفراز الأستروجنس طوال السنوات التي يمكن للأنثى فيها التناسل، تلعب

في تلك الأثناء هرمونات الأستروجنس دورا هاما في تنظيم الدورة الشهرية .

ويخرج من الرحم (uterus) مرة كل ٢٨ يوما (أحيانا أكثر أو أقل أو حتى على فترات غير منتظمة في المرأة السليمة) كمية صغيرة من الدم وبعض منتجات تمزق الأنسجة . وتعرف هذه العملية بالعادة الشهرية (Menstruation) والتي تستمر لمدة ٤-٥ أيام تبدأ في أثنائها فوليكل جديدة في النمو داخل أحد المبيضين. وبعد إنتهاء الدورة الشهرية تستمر الفوليكل في النمو ومنتجة كميات أكثر من الأستروجنس (الشكل ١٧-١٣) .

وتتنبه خلايا الفوليكل لأنتاج هرمونات الأستروجنس بالتأثير المزدوج لهرموني (FSH) (وهـو الهـرمـون المنبه للفوليكل)، (LH) واللـذين يقـوم بأفـرازهمـا الغـدة النخاميـة . وكمـا فـي الذكـر فأن إفـرازات هرموني (FSH)، (LH) ينظمها عامل أو عوامل خاصة تفرزها خلايا المخ في منطقة الهيبوثالاماس. هذا و وجود الأستروجنس في الدم في الأنثى (التستستيرون في الذكر) يثبط نشاط عامل خلايا الهيبوثالاماس، بالتالي يقلل من إفراز هرمـونات (FSH) ، (LH) من الفص الأمامي للغدة النخامية والتي تعمل بدورها على الأقلال من مستوي الأستروجنس (الشكل ١٧-١٤) .

ويؤثـر إرتفـاع مستـوى الأسـتروجنس أثنـاء الـدورة الشهرية على تركيب منطقة الأندومتريام (Endometrium) وهي المنطقة المبطنة للرحم، فتصبح تلك المنطقة أكثر سمكا (الشكل ١٧-١٣) وأكثر إمدادا بالدم. ويحدث أيضا في وقت الدورة الشهرية



الشكـل ١٧-١٤. طرق الـتحـكـم التي تنـظيم مستويات هورمونات الجنس في الأنثى. ارتفـاع مستـوي الأسـتروجينـز يثبط افـراز نشـاط الـفـعـل في الهيبـوثـالامـاس (قضيب). وهـذا يؤدي في النهـايـة الى هبـوط فـي مسـتـوي الأستروجينـز وبالتـالي الـى تجديد نشاط الهيبوثالاماس. توجد طريقة مماثلة في الذكور. فعامل افراز انتاج (FSH) ، (LH) يسمى أيضا هورمون مفرز للجونادوتروبين (Gn RH)

عدة تغيرات رئيسية في داخل الفوليكل. وتحت تأثير هرمون (LH) تتم البيضة النامية أنقسامها الأختزالي (والذي تم التنبيه له منذ سنوات عدة سابقة). وعلى العكس من إنتاج الحيوانات المنوية عن طريق الأنقسام الأختزالي، فأن سيتوبلازم البيضة النامية لا ينقسم بالتساوي، بل إن إحدى الخليتين الناتجتين من هذا الأنقسام الأختزالي تكون صغيرة (الجسم القطبي الشكل ١٧-١٤) و تتلقى عددا أكثر قليلا من أحد مجموعات الكروموسومات.

وبعد نحو الأسبوعين من حدوث الدورة الشهرية يحدث التبويض (Ovulation). فالاستجابـة الفجائية لهرمون (LH) (الشكل ١٧-١٣) تتمزق الفوليكل وتقذف البيضة الناضجة الثنائية الكروموسومات، ثم تقذف بعد ذلك نفس البيضة الى الطرف النهائي المفتوح من قناة فالوب (الشكل ١٧-١٢) وتبدأ تلك البيضة في التحرك ببطء لأسفل الأنبوبة.

وبمجـرد الأنتهاء من طرد البيضة تكون وظيفة الفوليكل قد أكملت. و بتنبيهها بالهـرمـون (LH) تتحول الفوليكل الى كورباس لوتيام (Corpus Luteum) والتي تعتبر كذلك غدة صماء تفرزهرمون البروجستيرون (الشكل ١٧-١٥). ولمدة عشرة أيام بعد التبـويض تستمر مستويات الدم المرتفعة من البروجستيرون في تهيئة الرحم لأمكانية الحمل كما تمنع انقباض الرحم وتمنع كذلك نمو أي فوليكل جديدة.

و إذا لم يحدث الأخصاب (وهي الحالة الغالب حدوثها) فأن إنتاج البروجستيرون يبدأ في الهبوط ويكون ذلك في حوالي اليوم السادس والعشرين من الدورة الشهرية، تضمحل الكورباس لوتيام ويبدأ الغلاف الداخلي للرحم في التمزق، في اليوم الثامن

شكـل ١٧-١٥. بروجستيرون، أحد هرمونات الأنثى الجنسية. مثل جميع الأستيرويدات يتكون من هيكل مكون من ١٧ ذرة كربون (ملونة).

والعشرين يبـدأ نزول دم العـادة الشهـرية ثانية ويتسبب أنقـطاع وجـود هرمـون البروجستيرون في ظهور تقلصات الرحم (وهو ما يظهر في اليوم الأول أو الثاني عند بدء ظهور الدورة الشهرية)، كما تبدأ الفوليكل في النمو الثانية.

ويستمر حدوث الدورة الشهرية لعدة سنين، ولكن بالتدريج، عادة ما بين سن ٤٢، ٥٢ من العمر، تقل أستجابة الفوليكل لهرمونات (FSH) ، (LH) وتبدأ الفوليكل في التقليل من إفرازاتها من الأستروجين، تصبح عمليتا التبويض والدورة الشهرية غير منتظمتين حتى تتوقفان تماما. ويطلق على توقف عملية الدورة الشهرية سـن اليأس Menopause.

وبهبوط مستوي الأستروجنس الى عشر أو أقل من مستواه السابق تخرج الهيبوثالاماس من دائـرة التأثـر بالأستروجنـس (الشكل ١٧-١٤)، نتيجـة لـذلك فهـي تنبه الغدة النخـاميـة لزيـادة نشاطهـا وبذلك يرتفع تركيز هرمونات (FSH) ، (LH) في الدم الى عشرة أضعاف أو أكثر من تركيزها السابق.

ويحدث الشيء نفسه في الرجل المسن، إذ يصحب أرتفاع هرمونات (FSH) ، (LH) في الدم إنخفاض أنتاج التستستيرون، ولكن يكون هذا الأنتقال تدريجيا في الذكور.

١٧-٨. التزاوج والأخصاب:
COPULATION AND FERTILIZATION

لضمان حدوث الأخصاب لابد من وضع الحيوان المنوي داخل المهبل قرب وقت حدوث التبويض. ويحدث نقل الحيوان المنوي للأنثى أثناء عملية التلقيح (التزاوج). وكنتيجة للهياج الجنسي تتمدد الشعيرات التي تنقل الدم إلى القضيب، ويتجمع هذا الدم في ثلاثة فراغات أسطوانية اسفنجية تسير موازية لبعضها البعض بطول القضيب، ويسبب الضغط الناشيء عـن ذلـك كبر القضيب وانتصابه وبذلك يستطيع أن يخترق المهبـل وتتسبب حركـة القضيب ذهـابا وإيابا داخل المهبل في إزدياد التوتر الجنسـي لدرجـة حـدوث الـقـذف، كمـا ينـتـج عن إنقبـاض جـدر قنـوات الخصيـة دفـع الحيوانـات المنويـة الـى الوعـاء الناقـل. يضـاف السائـل للحيـوانـات المنويـة من الحـويصـلات المنـوية (Seminal vesicles) ومن غدة الـبروستـاتا (Prostrate gland)

(الشكل ١٧-١١). والسائل المذكور ما هو إلا منبع للطاقة (الفركتوز) وربما بطريقة أخرى إيجاد الوسط الكيميائي الملائم للحيوان المنوي. ويطلق على الحيوانات المنوية والسـائل المـذكـور بالسـائل المنوي (Semen) الذي يمر من القناة البولية ويدخل المهبل.

وتحدث تغيرات فسيولوجية في كلا الذكر والأنثى نتيجة الهياج الجنسي ولو أن تلك التغيرات غير ظاهرة. وعلى العكس من الذكر، فأن الأستجابة للهياج الجنسي في الأنثى ليست من لوازم حدوث التلقيح والأخصاب.

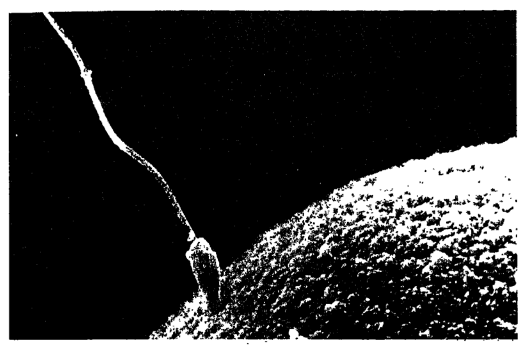
وبمجرد وضع الحيوانات المنوية داخل المهبل، فأنها تأخذ طريقها خلال الرحم ثم الى قنـوات المبيض (والمسماه بقنوات فالوب في الأنسان) حيث يحدث الأخصاب إذا وجدت بيضة ناضجة.

ولو أنه في استطاعة الحيوانات المنوية السباحة عدة ملليمترات في كل ثانية، فأن رحلتها الى قنوات فالوب تساعدها التقلصات العضلية لجدر الرحم وجدر قنوات فالوب نفسها. وعموما فيمكن للحيوانات المنوية الوصول الى البيضة في خلال ١٥ دقيقة بعد عملية القذف، كما يموت الكثير من تلك الحيوانات أثناء هذه الرحلة. وجدير بالذكر أن القذفة الواحدة تحتوي على عدة مئات الملايين من الحيوانات المنوية ولكن لا يتم منها الرحلة إلا آلاف قليلة فقط، من هذه الآلاف ينجح حيوان منوي واحد فقط في دخول البيضة لأخصابها (الشكل ١٧-١٦).

١٧-٩. الحمل والولادة: PREGNANCY AND BIRTH

يبـدأ النمو الجنيني بالفعل والبيضة المخصبة مازالت داخل قناة فالوب. ويستمر الجنين النامي في النزول داخل القناة ويصل الى الرحم في خلال يومين أو ثلاثة. ونتيجة للإنقسام المستمر الغير مباشر تتكون كرة مجوفة من الخلايا تسمى بلاستوسيست (Blas-tocyst) (الشكـل ١٧-١٧)، بعد نحو أسبوع من الأخصاب تغرز البلاستوسيست نفسها في جدار الرحم السميك في عملية يطلق عليها أسم الزرع (Implantation)، بأنتهاء عملية الزرع بنجاح تثبت عملية الحمل.

ويستمـر نمـو البـلاستوسيست بأنقسام سريع للخلايا مع حدوث هجرة لبعض



شكل ١٧-١٦. لحظة اخصاب بيضة قنفذ البحر (Sea Urchin) كما ترى تحت الميكروسكوب الأليكتروني (المسّـاح) . (بتصريح من دكتور دون و. فاوست).

الخلايا من مكان الى أخر داخل الجنين النامي . وكنتيجة لذلك ينشأ قسمان رئيسيان من الخلايا والأنسجة وهما :

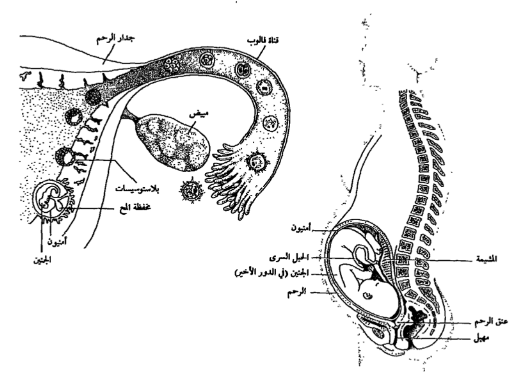
(١) الجنين نفسه والذي سيصبح فيما بعد الطفل،

(٢) الأغشية الجنينية الأضافية والتي ستلعب دوراهاما في العملية ولكنها ستزول فيما بعد وقت الولادة (الشكل ١٧-١٧) . وتتكون تلك الأغشية الجنينية الأضافية من الأمنيون (Amnion) والمشيمة (Placenta) والحبل السري (Umbilical Cord) والأمنيون ما هو الا عبارة عن حافظة (Sac) تحيط بالجنين وتملا بالسائل الأمنيوتي، تنمو المشيمة بالأتصال مع جدار الرحم و أوعيته الدموية التي يجري فيها دم الطفل النامي وتكون محاطة بدم الأم في الرحم. وبالرغم من عدم وجود أي خلط أو مزج بين دم الأم ودم الطفل إلا أنه في استطاعة المشيمة القيام بعملية نقل عدة مواد بين الأم والطفل. ويمكن القول بأن المشيمة تقوم بعملية أمعاء الطفل (استقبال الغذاء)، الرئة (استقبال الأوكسجين وطرد ثاني أكسيد الكربون)، الكلية (طرد اليوريا)، يمكن أيضا

لبعض الـبروتينـات مثل الأجسام المضادة في الأم عبور المشيمة. هذا ويصل الحبل السري الجنين النامى بالمشيمة.

ويتم تكوين التركيب الأساسي للطفل أثناء شهري الحمل الأوليين، يشمل هذا انقسام الخلايا، هجرة الخلايا، نمو الخلايا الى أشكالها الموجودة في العضو البالغ (على سبيل المثال الخلايا الدموية والخلايا العصبية وغيرها). ويطلق على الكائن النامي في تلك الفـترة بالجنـين (Embryo) ويكـون حساسا للغاية لأية تدخلات تعوق حدوث العمليات المذكورة سابقا. فأصابة الأم مثلا بأي مرض فيروسي مثل الحصبة الألمانية أو تعـرضها لأيــة مواد كيميائيــة قد يصيـب الجنَيـن بتشوهـات خلقيــة. وتسبب تناول النسـاء الأوروبيات الحامـلات لـدواء يسمـى ثاليدومـايـد (Thalidomide) بين عامي ١٩٥٤، ١٩٦٢ في ولادة عدة ألاف من الأطفال المشوهين.

وبعد نحو الشهرين، تكون جميع أجهزة الطفل قد تكونت ولكن في صورة أثرية.



الشكل ١٧-١٧. يسار: أطوار في النشوء المبكر، زراعة الجنين. محفظة المح والأمنيون هي أغشية خارج جنينية. يمين: طفل قرب الولادة.

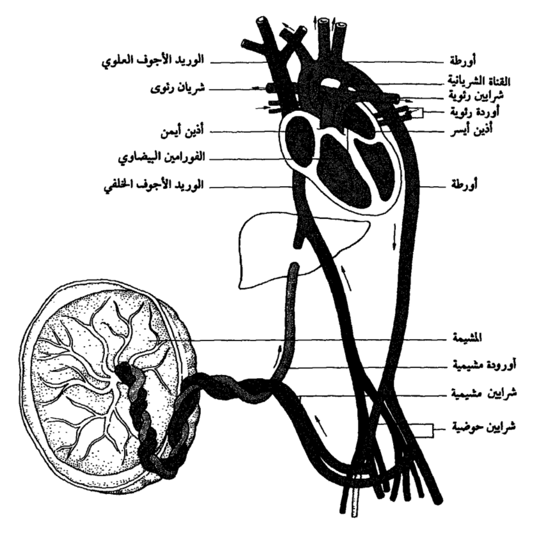
ومن الان فصاعدا فان نمو الفيتس (Fetus) حيث يسمى الجنين الان، يحدث بصورة تدريجية مع حدوث بعض التعديلات الطفيفة، تكون حساسية الجنين الان للعوامل الضارة الخارجية المتسببة عن الأم أقل بكثير.

ويؤثر حدوث الحمل في الدورة الشهرية، فمجرد زرع أي غرس الجنين نفسه في جدار الرحم تمتنع عملية إندثار الكورباس لوتينام والتي تحدث عادة قرب نهاية الأسبوع الرابع للدورة، نتيجة لذلك يستمر إفراز البروجستيرون. وعموما إذا توقف إفراز هذا البروجستيرون أثناء الأشهر الخمسة الأولى من أشهر الحمل بواسطة الكورباس لوتيم (وذلك بسبب إزالة المبيض نتيجة عملية جراحية) يبدأ الرحم فورا في الأنقباض وينزل الجنـين ناقص النمـو (أي تحدث عميـة سقاطة Abortion) وتكون الكورباس لوتيم عندئذ عاجزة عن العمل، ولكن تقوم المشيمة نفسها بأفراز هرمون البروجستيرون مما يجعل الحمل مستمرا حتى أخر مدته العادية.

وللمشيمة فوائد أخرى كغدة صماء، فبجانب إفرازها للبروجستيرون، فأنها تفرز هرمـون الأسـتروجنس (Estrogens) وهـرمـون أخر يشابه الهرمونات المنبهة للأجهزة التناسلية وهي (LH , FSH) والتي تفرزها الغدة النخامية. وجدير بالذكر هنا أن إفراز (FSH) و (LH) يتوقف تمـامـا أثنـاء الحمل وهـذا بـدوره يوقـف نمـو فوليكلز (Follicles) جديدة أثناء هذه الفترة.

وانتهـاء إفـراز المشيمة للبروجستيرين يزيح العائق المتسبب في أيقاف الرحم عن الأنقباض أثناء فترة الحمل، كما تظهر في هذا الوقت أيضا لأول مرة هرمونات أخرى تسبب أنقباضات شديدة في الرحم، أحـد هذه الهرمونات هو هرمون الأوكسيتوسين (Oxytocin) الذي تقوم بصنعة خلايا الهيبوثالاماس في المخ وينزح الى الدم من الفص الخلفي للغدة النخامية. وتوجد أيضا عدد من المواد المشابهة تسمى بروستا جلاندينز (Prostaglandins) (تم أكتشافها في أول الأمر في السائل المنوي) تظهر في دم الأم وفي السـائـل الأمنيوتي أثنـاء وقت الـولادة. وتسبب مواد الـبروستـاجـلانـدينـز، مثـل الأوكسيتوسين، أنقباض الرحم بشدة وعندئذ تبدأ عملية الولادة.

وأول نتـائج عمليـة الوضـح هـو فتح عنق الرحم (Cervix) ، بالأنقباضات القوية والمستمرة ينفجر الأمنيون ويخرج السائل الأمنيوني للخارج من فتحة المهبل، في هذا



الشكل ١٧-١٨ . الدورة الدموية في جنين انسان . يلتقط الأوكسجين عند المشيمة وليس عند الرئتين . أغلب الدم يتخطى الرئتين بمروره خلال الـ Foramen ovale والقناة الشريانية .

الوقت بالذات يكون الحبل السري مشدودا ، تتمدد رئتا الطفل وتبدآن في التنفس (قد تحتاجان لمساعدة أحيانا) ، يتوقف تدفق الدم عن طريق الحبل السري ويبدأ دم الطفل في التدفق عن طريق القلب والأورطة وشرايين الرئة (الشكل ١٧-١٨) ، وبعد نزول الطفل بقليل ينفصل الحبل السري والمشيمة .

وفي خلال يومين أو ثلاثة بعد الولادة ، يبدأ ثدى الأم في إفراز اللبن ، ويتطلب هذا أيضا التعاون بين المنبه الهرموني والمنبه العصبي . ويؤدي التنبيه المتسبب عن رعاية الطفل الذي يعمل عن طريق خلايا الهيبوثالاماس الى إفراز العديد من الهرمونات

(ومنها الأوكسيتوسين) الضرورية لتصنيع اللبن وإفرازه.

١٧-١٠. هندسة التكاثـــر : أفاقهـا :

REPRODUCTIVE ENGINEERING : THE PROSPECTS

مهد التقدم السريع في فهم فسيولوجية التكاثر عند الأنسان الطريق لممارسة طريقة التكاثر بطرق لم تخطر على البال من قبل.

فأحـد طرق التقدم التكنولوجي الذي يمارس حاليا بالفعل هو القدرة على تجميد وحفظ السائل المنوي للانسان لاستخدامه مستقبلا، وفيما بعد (ربما بعد عدة عشرات من السنين) يمكن أدخال هذا السائل المنوي الى داخل القنوات التناسلية للأنثى. ونشـأت هذه الطريقة أول الأمر كوسيلة ميسرة لتلقيح الأبقار في أي مكان في العالم بالسائل المنوي للثيران الممتازة مما يسرع في أنتاج سلالات جديدة من الماشية، والآن تستخدم نفس الوسيلة مع الأنسان. ولقد تكونت بالفعل عدة بنوك لحفظ الحيوانات المنوية في الولايات المتحدة الأمريكية، لو أن الحيوانات المنوية المحفوظة بهذه الطريقة ليست في الحـالـة الجيدة التي يمكن أن تكـون عليهـا الحيوانات الطازجة (يلزم من الحيوانات المحفوظة ١٤ حقنة في المتوسط لأحداث الحمل في المرأة) إلا أنه أمكن الأن إنتاج طفل بأستخدام الحيوانات المنوية المحفوظة لرجل توفي بالفعل أو حتى بعد عقمه أو ماذا يمنع أن يكون مثل هذا الرجل أبا لعدة أطفال تنجبها عدة نساء.

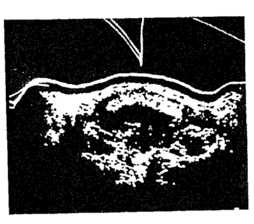
وأمكن للعلماء والبيطريين الآن منذ عدة سنين نقل أجنه من الأناث التي أنجبتها الى أمهـات حاضنـة تحملها حتى الولادة. ويحدث ذلك الآن بطريقة روتينية في الفئران والأرانب والماشية. وفي الحقيقة فلقد أمكن بنجاح زرع أجنه فئران في أمهات حاضنة بعد تجميد تلك الأجنة وتخزينها لمدة تزيد عن الأسبوع.

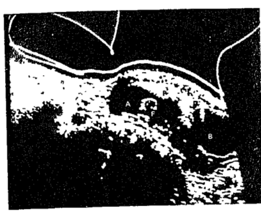
وفـي عـام ١٩٦٩ أمكـن للعـالم ر. ج. ادواردز (R. G. Edwards) ومساعدية في جامعة كمبردج بأنجلترا نزع بيضة الأنسان من خلايا الفوليكل (أي قبل التبويض Ovulation) وإخصابها معمليا ثم تركها تنمو (معمليا أيضا) حتى طور البلاستوسيست الجنيني. والخطوة التالية المعقولة الممكن تجربتها بعد ذلك هي معرفة إن كان من الممكن

لجنين في هذا الطور المبكر من النمو أن يوضع في رحم ويمكنه زرع نفسه في جدار هذا الرحم الذي يحمله حتى الولادة. ولقد نجح إدواردز ومساعدوه في ذلك عام ١٩٧٧ ، إذ أمكن انتزاع بيضـة الانسـان من فوليكـل إحـدى الأمهـات وإخصابها معمليا وترك كل بيضة تنمو في كتلة من الخلايا، امكنهم بعد ذلك زرع إحدى هذه البويضات في رحم الأم التي أخذت منها تلك البويضة وتم بنجاح ولادة طفلة في يوم ٢٥ يوليو ١٩٧٨ من هذه الأم، كانت تلك الطفلة أول سلسلة من الأطفال تم إخصاب بويضاتهم خارجيا، بذلك تسمح الطريقة المذكورة للأمهات الحاملات لأنابيب فالوب مقفلة أن يحملن أنفسهن بأطفالهن. وعموما سهلت الطريقة المذكورة للأمهات الغير قادرات أو الغير راغبـات في الحمـل من زرع جنينها في رحم أم أخرى حاضنة (Foster) وبذلك يمكن للأبوين الحصول على أطفال يحملون صفاتها الوراثية.

هذا وتمكننا أيضا القدرة على حفظ أجنه مبكرة في بيئة صناعية لمدة قصيرة من تحديد جنس الجنين قبل زراعته، إذ أمكن فصل عدة خلايا واختبارها لمعرفة وجود كروموسوم الـذكـر Y أو جسـم العقـم (Barr Body) (أنظر الفقرة ١١-١٣)، وبهذه الطريقة يمكن زراعة الجنين المرغوب فيه فقط، ولقد نجحت هذه الطريقة في الأرانب. وإذا ما أجريت هذه الطريقة في الأنسان، على سبيل المثال، فأنها تمكن حاملي خاصية الرابطة X (مثل مرض الهيموفيليا) من الأختيار لتفادي المخاطرة في الحصول على ابن مصاب.

وفي حقيقة الأمر، أمكن الأن معرفة التكوين الوراثي للجنين، إذ أن الجنين أثناء نموه يطرد بعض خلاياه الى السائل الأمنيوتي، بدون صعوبة كبيرة يمكن أخذ بعضا من هذا السـائـل الأمنيوتي (بـطريقـة تعـرف بأسم أمنيوسنتيزس (Amniocentesis) (الشكـل ١٧-١٩) وفصـل الخلايا المذكورة من السائل الأمنيوتي و زراعتها في بيئة صناعية وبفصحها بواسطة الطبيب المختص يمكن لهذا الطبيب البحث عن التشوهات الكـروموسوميـة (مثل الثلاثـة كروموسومات رقم ٢١ لسندروم داون -Down's Syn drome) والبحث أيضا عن بعض الأنحرافات الأنزيمية التي يسببها ظهور الطفرات (مثل عدم القدرة على القيام بعملية التمثيل الغذائي للجلوكوز أي تكوين اللبن)، البحث كذلك بطبيعة الحال عن جنس الجنين. والآن يمكن تشخيص نحو ١٠٠ تشوه وراثي عن طريق عملية الأمنيوسنتيزس هذه، بذلك يمكن انهاء الحمل إذا ما وجدت هذه التشوهات.





شكل ١٧-١٩ . استخدام فوق الصوت لتحديد موقع المشيمة قبل افراز سائل الأمنيون ويمكن احداث هذه السونوجرامز بتسجيل الأصداء التي تستقبل من التركيبات الموجودة في البطن. (A) الفـراغ الأمنيـوتي، (B) المثـانـة البولية، (F) جزء من الجنين، (أ) المشيمة. كلا الطولى (يسار) والعرضى (يمين) من قطاعات الاسكانج نحتاج اليها لمعرفة موقع المشيمة بدقة. (بتصريح من مركز داون ستيت الطبي لجامعة ولاية نيويورك).

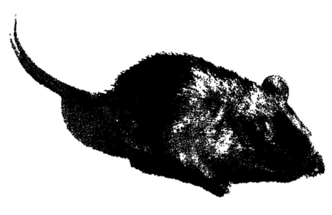
ولو أن حدوثة غير عملي بالنسبة للأنسان، الا أن حلم العلماء هو أنتاج طفل له أربعة أباء. ولقد تمكن العلماء بالفعل منذ عدة سنوات من الوصول الى إنتاج فئران لها أربعـة أبـاء وأمكن حدوث ذلـك بأخـذ الأجنة في دور الثماني خلايا من النمو من أبوين من فأرين مختلفين حاملين وتربية تلك الأجنة في بيئة صناعية، فاذا دفعت إحدى تلك البويضات لتصطدم ببويضة أخرى مجاورة لها في البيئة الصناعية فانها تلتحم معها في جنين واحد. وبعد فترة أخرى من النمو يزرع هذا الجنين المتحد في أم حاضنة ويترك للنمو نموا طبيعيا بعد ذلك. وتنشأ بعض خلايا كل عضو في هذا الجنين المبرقش أو الموزايكي (Mosaic) (انظر فقرة ١١-٣) من زوج من الأباء والبعض الأخر من الزوج الأخر من الأباء (الشكل ١٧-٢٠) ولقد أثبت هذا الفأر الرباعي الأباء أهمية كبري في دراسة العديد من المشكلات الحيوية الهامة.

ويوجد احتمال مستقبلي في السنين القادمة في أيجاد طريقة تمكن الأنسان من التكاثر لاجنسيا (Asexually). فأذا أمكن حدوث ذلك فيمكننا خلق مجاميع متماثلة (Clones) تشتمـل على أفـراد متـماثلة وراثيا تمامـا، كما فعلنـا مع تفـاح الماكنتوش (انظر فقرة ١٦-١٠). وفي الـوقت الحاضر، فيما عدا القليل من الحيوانات الواطئة مثل بعض الديدان، لايمكن لأي نسيج حيواني منزوع أن ينمو لتكوين كائنات جديدة بالطريقة

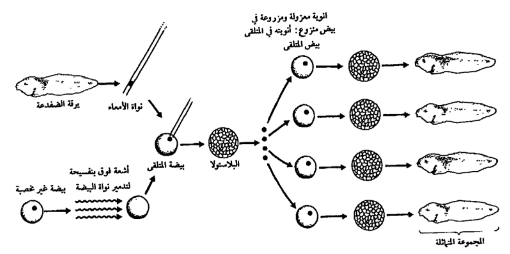
التي يمكن بها لفرع من أفرع شجرة تفاح مثلا أن ينمو ويكون شجرة أو شجيرات جديدة (الشكل ١٦-١٥). والبويضة المخصبة فقط في الحيوان هي حتى وقتنا هذا القادرة على النمو لتصبح حيوانا كاملا، كما رأينا من قبل تنتج البويضات المخصبة من التكاثر الجنسي. لذلك فأن تلك الحيوانات تحصل على جيناتها من أبوين، وكل من هذين الأبوين قد أعاد ترتيب مجاميع جيناته المزدوجة أثناء الأنقسام الأختزالي. وعلى هذا فان الحيوانات بل الأخوة والأخوات - تختلف وراثيا، إلا في بعض الحالات النادرة التي ينفصل فيها جنين واحد الى جزئين أو أكثر والتي تستمر في النمو مكونة توائم أو ثلاثيات، الخ، وهذه كلها تكون أفرعا حيوانية جديدة.

ويمكن إجراء تلك العملية الآن في المعمل، فمنذ عدة سنوات أمكن للعالم بوفيري (Boveri) أن يفصل نواه إحدى بويضات قنفذ البحر (Sea Urchin) وتنميتها تبعا للجينات المنزرعة بداخلها من نواه أخرى (انظر فيما سبق الشكل ٥-٩). والطريقة الوحيدة التي أمكن للعالم بوفيري بها أن يدخل النواه الجديدة هي استغلاله للخواص الطبيعية المخصبة للحيوان المنوي، هذه ولو أنها ناشئة عن الأنقسام الأختزالي فأنها تختلف وراثيا مع أنها ناتجة من فرد واحد.

ولكن ماذا يحدث لو أمكن جمع أنوية ناشئة عن أنقسام غير مباشر، وتكون كلها بذلك موحدة وراثيا، وضع تلك الأنوية في بويضات نزعت أنويتها من قبل، كل نواه



شكل ١٧-٢٠. فأر رباعي الوالدين، لهذا الفأر أبوين وأمين (بدون ضم الحاضنة التي ولدته). أحد أزواج الوالدين كان أسودا، والزوج الثاني كان أبيضا. جلدة وكذلك باقي الأعضاء خليط من الخلايا من الأبوين السود وخلايا من الأبوين البيض. ويسمى مثل هذا الحيوان موزايك وراثيا. لاحظ أن هذا الفأر ليس مثل الهجين F1 الناتج من تزاوج فأر أبيض مع فأر أسود. في مثل هذه الحالة، تكون كل الخلايا من نفس الطراز الجيني (والفروه الخارجية للفأر تكون كلها بنية). (الصورة - والفأر - بتصريح من دكتور توماس ج. ويجمان).



الشكل ١٧-٢١. طريقة زرع الأنوية. تسحب نواه من خلة واحدة (في هذه الحالة في الأمعاء) وتزرع في بيضة تم اتلاف نواتها بالأشعة. وبعد حدوث الانقسام الغير مباشر في البيضة في كتلة من الخلايا المتشابهة وراثيا (البلاستولا). يمكن تكرار العملية بسهولة بهذه الخلايا كمنبع للأنوية. وبهـذه الطريقة يمكن انتاج مجموعة متماثلة (Clone) من الحيوانات.

في بويضـة؟ لقـد أمكن حدوث ذلـك لأول مرة في بيض الـبرمائيات. وكان الهدف الأسـاسي من تلك التجـارب أختبـار قدرة أنـوية الخـلايا الجسمية على توجيه نمـو البويضات. وطرق ونتائج تلك التجارب سيتم شرحها في الباب التالي (أنظر الجزء ٥ من الفقـرة ١٨-٥ والشكـل ١٨-١٠). وإذا حقن الأنسان مجموعة من البويضات المنزوع منها أنويتها بأنوية أخرى مأخوذة من فرد واحد، فكل حيوان ناتج يشابه تماما باقي الحيوانات، ويمكن بذلك إنتاج مجموعة متماثلة وراثيا (Clone) (الشكل ١٧-٢١).

ونظرا لصغر حجم بويضات الثدييات بكثير عن حجم بويضات البرمائيات، فأنه من الصعب جدا إجراء إختبارات نقل الأنوية فيها. ومع ذلك فقد ذكر إلمنزي، هوب (Illmensee & Hoppe) عام ١٩٧٩ أنهما (بعد الفشل ٣٦٣ مرة) أمكنهما إنتاج ثلاثة فئران بطريقة زرع الأنوية (الشكل ١٧-٢٢).

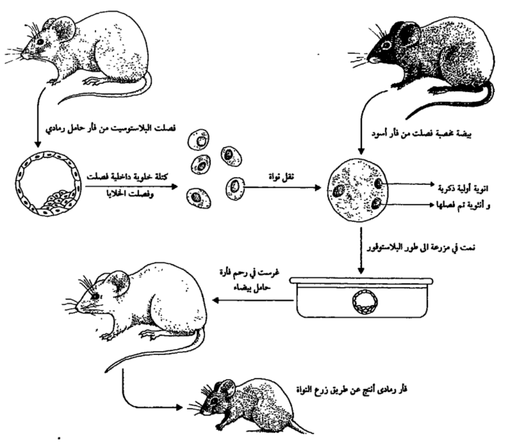
والطريقة التي إتبعاها تشاهد في الشكل ١٧-٢٣ وكل من الفئران الثلاثة الأولى نتج من زرع نواه من متبرع مختلف. وعموما، أمكن لهذين العالمين فيما بعد إنتاج توائم وثلاثيات (Triplets) متشابهة بعد زرع أنوية من نفس المتبرع في عدة بويضات منزوعة



شكـل ١٧-٢٢. ثلاثـة فئران أنتجت بواسـطة زرع الأنـويـة باستخـدام الطريقة التي ترى في شكـل ١٧-٢٣ وهـذا العمـل المبـاشر أمكن اجـراؤه بواسـطة العـالم البيـولـوجي كارل المنسى والعالم بيتر هوب. ولو ان كل من هذه الفئـران الثـلاثة نمـا تحت تحكـم نواه من متـبرع مختلف، ولكن في محاولات لاحقـة أنتج المنسى وهوب عدة فئران من متبرع واحد وبذلك خلقوا كلون حقيقي (بتصريح من بيتر هوب، من الخلية Cell، جزء ٢٣، مطبعة MIT ؟، يناير ١٩٨١).

الأنوية. وبمعنى أخر فلقد أمكنهما إنتاج أفـراد متماثلة (Clones) من الفئران. ولو أن إنتاج هذه الأفراد المتشابهة من الفئران تعتبر عملية صعبة ودرجة نجاحها قليلة، فلا يوجد سبب نظري يجعلنا نعتقد أن ما نجح في الفيران الآن قد ينجح فيها بعد في الأنسان.

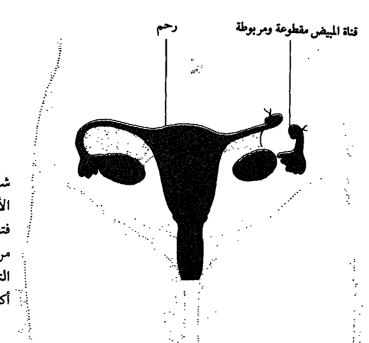
ولا يجب عند مناقشة طرق ممارسة التكاثر في الأنسان تجاهل أهم الطرق جميعها والـواسعة الأنتشار وهي: الطرق المختلفة التي بها يوقف الزوجان الحمل، من تلك الطرق أستخدام حواجز ميكانيكية في طريق مرور الحيوانات المنوية، جهاز IUD الذي يوضع في داخل الرحم والذي يمنع زرع البويضة في جدارة، إستخدام مستحضرات من الأسـتروجين - البروجيستيرون (وهي حبوب منع الحمل) والتي توقف التبويض (وسنناقش وظيفة تلك الهرمونات أكثر من ذلك في الباب السابع والعشرين). وأخيرا فانـه يمكن تفـادي الحمـل بربط قنوات فالوب في الأنثى لمنع إخصاب أي بويضة (الشكـل ١٧-٤٨)، مع أستمـرارية المبايض في أداء وظائفها ومنها دورة الهرمونات العادية. ويمكن في الذكر إجراء عملية خصى وذلك بقطع كل وعاء ناقل قرب قمة الصفن (Scrotum) (الشكل ١٧-١١) ثم ربطه، هي عمليّة جراحية بسيطة يمكن إجراؤها في عيادة الطبيب تحت تأثير التخدير العادي وذلك في مدة ٣٠ - ٤٠ دقيقة، لا يتعطل النشاط الهرموني للخصى بأي حال من الأحوال، كما لا توقف تلك العملية



الشكل ١٧-٢٣ . استخدمت طريقة زرع النواة لانتاج الفأر في الشكل ١٧-٢٢ . (فروة أجوتية Agouti ، وليست فروة رمادية . زود المتبرع النواة المستخدمة في انتاج الفأر الموجود على الجهة اليمني في الشكل ١٧-٢٢).

إنتاج الأفرازات الغدية المختلفة والتي تكون المجموع المنوي، بذلك يستمر التلقيح والقذف كالمعتاد.

ولو أنه يبدو أن بعض الأفكار السابق ذكرها قد تعطي نتائج غير عملية فان الوقت سيأتي في القريب عندما نستطيع أن نستفيد من تلك المعلومات الوراثية التي كان يظن منذ عشرة أو عشرين سنة أنها من المستحيلات.



شكـــل ١٧-٢٤. ربط الأنابيب، بسبب الحاجة الى فتحة في جدار البطن، لابد من اجراء تلك الطريقة تحت التخـديـر. انها عملية متقنة أكثر منها عملية عادية.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

يمكن لبعض أنواع الحيوانات أن تتكاثر لاجنسيا وجنسيا، لكن أغلب الحيوانات تتكاثر جنسيا فقط.

وتنتــج الجـاميطات بالأنقسام الأختزالي من خلايا جرثومية ثنائية الكروموسومات (تسمى اسبرماتوجونيا في الذكر، أو أوجونيا في الأنثى). وبما أن أغلب الحيوانات قادرة على الحركة فأنها تضع بيضها و حيواناتها المنوية قريبة من بعضها البعض لتسهيل عملية الأخصاب. وتختلف الحيوانات كثيرا في درجة مقدرتها على العناية بالبيض بعد إخصابه.

ويحيط الجنـين النامي في الزواحف والطيور والثدييات نفسه بأربعة أغشية جنينية إضـافية وهي: الكـوريون، الأمنيون، الكيس البـولي، محفظة المح. و تحمى تلك الأغشية الجنينية الاضافية الجنين النامي وتـزوده كذلك باحتياجاته الغذائية، لكنها لا تضيف أي بناء في تكوين الجنين نفسه.

وبخلاف الأنواع القليلة فقط من الثدييات واضعات البيض، فأن بيض الثدييات

يكون عادة صغير الحجم، إذ أن الجنين النامي يعتمد في غذائه على جسم الأم، يمكن توفير ذلك عن طريق حافظة المح في حيوانات المارسوبيالز (Marsupials) والمشيمة والحبل السري في الثدييات الأخرى. وفي كلا الحالتين لايوجد أي أتصال مباشر بين الدورة الدموية للأم والدورة الدموية للجنين النامي (المسمى عندئذ فيتس Fetus). وبعد الولادة تستمر جميع الثدييات في تناول غذائها من جسم الأم في صورة لبن (Milk).

وتتحكم الهرمونات في نشاط الجهاز التناسلي في أغلب الحيوانات، ففي الأنسان يتم إفراز عوامل مفرزة (Releasing Factors) من خلايا الهيبوثالاماس والتي بدورها تنبه الفص الأمامي للغدة النخامية لأفراز هرموني (FSH) و (LH) ويعمل هرمونا (FSH) و (LH) في الذكر على تنبيه الخصي لتفرز الحيوانات المنوية (الأسبرمات) وهرمون التستستيرون. وفي الأنثى فأن هرموني (FSH) و (LH) ينبهان المبيض لأفراز الهرمونات الجنسية: الأستروجنس والبروجستيرون.

وأمكن حديثا: (١) إخصاب بويضات الأنسان معمليا ثم إعادتها الى رحم الأم لتكملة نموها الطبيعي حتى الولادة، (٢) تكوين مجموعة متماثلة من الفئران (Clone) المتطابقة وراثيا وذلك بزرع أنوية ناشئة عن أنقسام غير مباشر من متطوع واحد.في بيض فأر نزعت منها أنويتها.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ـ يحدث أبقاء البيض المخصب داخل الجسم الأم في الأسماك الغضروفية والزواحف. لماذا تعتقد أن الطيور لم تستخدم تلك الطريقة لحماية بيضها؟

٢ ـ ما الفرق بين الحيوان المنوي والسائل المنوي.

٣ ـ ماهو التشابه الموجود عند تكوين البويضة في الضفدعة وتكوين الجرثومة الكبير في نبات الفاصوليا ؟ وما هي أوجه الفرق بينهما ؟.

٤ ـ ما الفرق بين الأمبليكس (Amplexus) والجماع (Copulation) ؟

٥ ـ أين يحدث الأخصاب في: (١) سمك التراوت،

(ب) سمك القرش، (ج) ملكة النحل،

(د) الضفدعة، (ه) الأنسان.

٦ ــ إذا رزقت أسرة بسبعة بنات وبدون أبناء، فما هي الفرص التي تمكنهم من أن يكون المولود القادم إبنا؟

٧ ــ ماعدد أنواع الخلايا المنوية (الأسبرمية) التي تفرزها دودة الأسكارس *Ascaris bivalens* (ن = ٢)؟ وكم نوعا من خلايا البويضات يمكنها إنتاجه؟

٨ ــ القليل من الحيوانات لها في نفس الفرد الأعضاء التناسلية المذكرة والمؤنثة، لماذا توجد هذه الظاهرة في أغلب النباتات. هل يمكنك إيجاد توضيح لذلك ؟

٩ ــ إن عدد البيض الذي تنتجه أفراد نوع من الأنواع يتناسب مع مدى العناية التي يعطيها هذا النوع لصغاره أثناء نموها. هل تتفق تلك الظاهرة أيضا مع كمية الحيوانات المنوية التي يفرزها هذا النوع؟ إشرح ذلك.

١٠ ــ ما هي الوظائف التي تقوم بها الأجسام المركزية في الأسبرماتوجونيات.

(أ) في تكوين الحيوان المنوي (الأسبرم)،

(ب) في تحول الحيوان المنوي

(ج) في الأخصاب؟

المراجع REFERENCES

1. EPEL., D., "The program of Fertilization," Scientific American, Offprint No. 1372, November, 1977. Describes the many changes that take place after a sperm encounters the egg.
2. BEACONSFIELD, P., G. BIRDWOOD, and REBECCA BEACONSFIELD, "The Placenta," Scientific American, Offprint No. 1478, August, 1980.
3. GROBSTEIN, C., "External Human Fertilization," Scientific American Offprint No. 1429, June, 1979. In addition to examining the ethical issues raised by these procedures, the author provides a superb account of the physiology of human reproduction.
4. FUCHS, F., "Genetic Amniocentesis," Scientific American, Offprint No. 1471, June, 1980. How genetic diseases can be diagnosed in the fetus.
5. DEVEY, G. B., and P. N. T. WELLS, "Ultrasound in Medical Diagnosis" Scientific American, Offprint No. 1389, May, 1978. How ultrasound is used to

explore safely in the interior of the body.

6. PATTON, S., "Milk," Scientific American, Offprint No. 1147, July, 1969.

CHAPTER 18 — الباب الثامن عشر

EARLY DEVELOPMENT — النشأة المبكرة

الباب الثامن عشر
النشأة المبكرة

١٨-١ . أطوار في نشأة الحيوان البالغ

STAGES IN THE DEVELOPMENT OF THE ADULT

تم في البابين السابقين معرفة الطرق التي تصنع بها الجاميطات و كيف تتقابل جاميطات الذكر مع مثليتها في الأنثى لحدوث الأخصاب، الذي لا يعتبر نهاية عملية التكاثر الجنسي، بل هو في الواقع (أي الاخصاب) بداية لسلسلة من التغيرات المتقنة و المنظمة والتي بدورها سينتج عنها حيوان بالغ جديد للنوع . ونحن نستخدم تعبير نشأة لوصف تلك التغيرات، ولو أن النموذج المحدد للنشاة يختلف من نوع الى آخر (وخاصة إذا ما كانت الأنواع ليست في درجة من التقارب) كما يوجد بعض التداخل (Overlapping). هذا ويمكن للمرء أن يميز المراحل التالية .

١ ـ الانشقاق (التفلج) CLEAVAGE

في هذه المرحلة من النشأة تقوم نواه الزيجوت بسلسلة من الأنقسامات الغير مباشرة (Mitotic) غالبا ما تنفصل الانوية الناتجة عن هذا الانقسام عن بعضها البعض بفواصل مع وجود جزء من سيتوبلازم الزيجوت حول كل نواة . ولا يوجد (او يوجد) قليل من النمو في تلك المرحلة .

٢ ـ التشكل التركيبي (المورفولوجي) MORPHOGENESIS

تستمر في هذه المرحلة الخلايا الناتجة عن مرحلة الانشقاق والمسماه بالخلايا البنوية (Daughter cells) في الانقسام، لكنها أيضا تتحرك وتنظم نفسها في

طبقـات وأنسجــة مميـزة، يظهـر نتيجــة لذلـك نمـوذج محـدد . ونشـوء هذا النمـوذج هـو ما يسمى بالتشكل التركيبي (المـورفولوجي) (Morphogenesis) ولـو أن خلايا الجنـين أثناء تلك المرحلة من النشوء تصبح منتظمة في مجاميع واضحة لكنها تكون كلها متشابهة في التركيب.

٣ ــ التشكل (التميـز) DIFFERENTIATION

بعـد ذلـك مباشرة، تبدأ خلايا الجنين الناشيء في أخذ التركيب والوظيفة اللذين ستكون عليها تلك الخلايا في الحيوان البالغ، إذ تتكون الخلايا العصبية والخـلايا العضلية، غيرهـا. ويطلق على هذه الطريقةالتشكل أو التميز، لأن الخلايا المتباينة تتركب على شكل أنسجة، والانسجة الى أعضاء والاعضاء الى أجهزة.

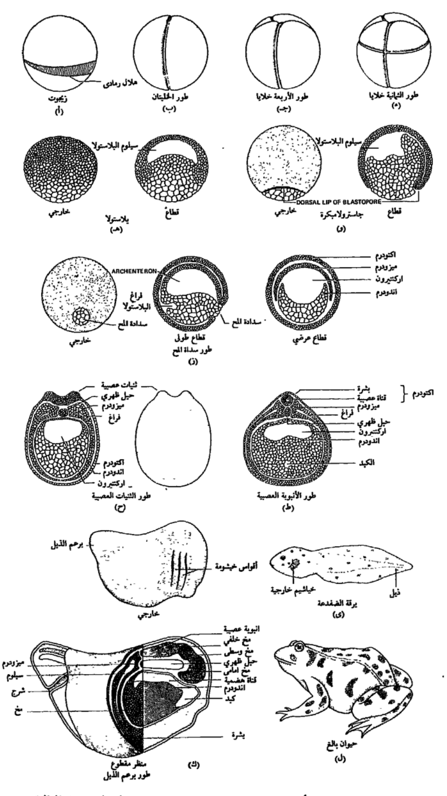
٤ ــ النمو GROWTH

وحتى بعد اكتمال تكوين أجهزة جسم الكائن، يتبع ذلك فترة من النمو تكبر أثنـاءهـا الاعضـاء وذلك لاستمرارية انقسام الخلايا أو كبر الخلايا نفسها أو كليهـما. ومهما كانت ميكانيكية النمو، فهو يعتمد على حصوله على مواد أكثر وطاقة اكثر مما كان يحتاجه لمجرد حفاظه على الوظائف البسيطة للأعضاء، إذ لابـد من تجمع بروتينات وكربوهيدراتات (و خاصة في النباتات) والكثير من الجزيئات الاخرى التي تميز الكائنات الحية.

وبينما يمر الكائن في الثلاث مراحل الأولى السابق ذكرها، فهو عندئذ يسمى جنين (Embryo) ولنتناول الآن هذه المراحل الثلاثة بالتفصيل.

١٨-٢. الانشقاق (التفلج) CLEAVAGE

وكما رأينا في الباب السابق، فان دخول الحيوان المنوي (الاسبرم Sperm) للضفدعة في داخـل بيضتها ينبه عدة أحداث، فيتم انقسام البويضة انقساما اختزاليا، يظهر الهلال الرمادي مقابل النقطة التي دخل منها الحيوان المنوي في البويضة، تلتحم نواه الحيوان المنوي مع نواه البويضة. وبعد اكتمال هذا الجزء الحيوي من عملية الاخصاب بقليل، يبدا أول انشقاق في الحدوث، فتنقسم نواه الزيجوت انقساما غير مباشر، يظهر



الشكل ١٨-١ . أطوار النشوء في الضفدعة (مستمرة في الصفحة التالية).

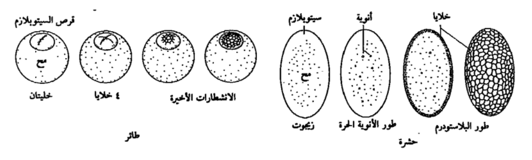
أخدود طولى مارا بقطبي البويضة (الشكل ١٨-١)، بذلك تنقسم البويضة الى نصفين.

وبعـد نحو الساعة بعد حدوث أول انشقاق في بويضة الضفدعة تنقسم الخلايا البنويةثانية، ويتكون أخدود آخر بقطبي البويضة ولكنه في هذه حالة يكون متعامدا على الأخـدود الأول. تنقسم كل من الخلايا الاربع المتكونة دوريا في مسطح أفقي (الشكل ١٨-١د)، يوجد هذا المسطح أقرب الى القطب الحيواني عنه الى القطب الخضري. ونتيجة لذلك تكون خلايا القطب الحيواني أحيانا أصغر من خلايا القطب الخضري الممتلئة بالمح (Yolk)، يستمر الانشقاق على التوالي حتى يتكون طور الـ (١٦) خلية ثم طور الـ (٣٢) خلية.

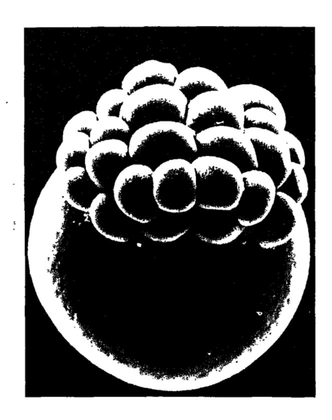
وباستمرارية عملية الانشقاق هذه، تبدأ خلايا القطب الحيواني في الانقسام أسرع من خلايا القـطب الخضري، لذلـك فان خلايا القطب الحيواني لاتكون أصغر في الحجم فقط بل أكثر عددا.

وأثنـاء تلك الفـترة تحدث هجرة بعض خلايا القطب الحيواني والتي توجه نفسها بحيث يتكون فراغ مملوء بالسائل، هو مايسمى بالبلاستوكول (Blastocoel) داخل كتلة الخلايا. والطور الذي يتم فيه تكوين هذه الكرة المفرغة من الخلايا يسمى بالبلاستولا (Blastula) وهو يبين نهاية طور الانشقاق. لاحظ أنه لم يحدث أثناء هذا الطور أي نمو في الاعضـاء الناشئة، كما أصبحت الكتلة الاصلية من الخلايا مقسمة بفواصل الى وحدات أصغر فأصغر.

وتبيض الزواحف والطيور اكبر بيض حجما في جميع الكائنات الحية، فعلى سبيل المثال، فأن بيضة الدجاجة تتكون من جزء صغير من السيتوبلازم مستندا على سطح



الشكل ١٨-٢. الانشطار في بيض الطيور والحشرات.

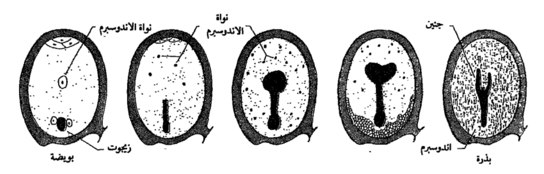


الشـكـل ١٨-٣. جنـين سمـك الـزرد فـي طـور ٣٢ - خلية. لاحظ أن تجاويف الانـشقـاق لا تستمـر لأسفـل خلال المح في البيضـة. (بتصريح من هـ. و. بيمز، ريتشارد ج. كاسل).

كرة المح الكبيرة (الجزء الابيض "White" من البيضة، ماهو إلا بروتين غير خلوي)، عند حدوث الانشقاق في بيضة الدجاجة، لايستمر أخدود الانشقاق للداخل مخترقا كتلة المح، نتيجة لذلك، تبقـى كل الخلايا الناتجة أثناء الاطوار الاولى من الانشقاق متجمعـة عنـد قمـة البيضـة وعلـى الجـوانب ويفصلهـا عن بقيـة البيضـة غشـاء خلـوي، لكـن تبقى قاعـدة كل خليـة علـى اتصـال مباشـر مع كتلـة المـح (الشكل ١٨-٢)، يوجـد هـذا الـنـوع مـن الانـشـقـاق الجـزيء أيضـا في بيضـة سمـك الـزرد (Zebrafish)

ويتركـز مح البيـض فـي الحشـرات في مـركـز البويضـة، لا يصحب الانشقاق فيها الانقسـام الغيـر مباشـر لنـواه الزيجـوت إذ بـدلا من ذلـك تنقسـم الانويـة البنوية (Daughter nuclei) باستمـرار ولكنهـا تبقى معلقة في داخل حجرة البويضة الوحيدة (الشكل ١٨-٢). وبعد إنتاج العديد من الانوية، فانها تهاجر الى حافة البويضة الغنية بالسيتوبلازم، هنا فقط تتكون أغشية الخلايا حول كل نواة.

ويتبـع نشـوء الـزيجـوت في النبـاتـات طرقـا مختلفـة عمـا هي فـي الحيـوانـات



الشكل ١٨-٤ . الانشقاق والتشكل المورفولوجي في الإندوسبرم. غذاء الجنين الناشيء يضمنه الأندوسبرم. مقياس الرسومات يقل من اليسار الى اليمين.

فالانقســام الغـير مبـاشر للزيجـوت يلازمـه دائمـا كبر الخـلايا في الحجم. ففي عاريات البذور (Gymnosperms) وكاسيات البذور (Angiosperms) تستطيل بعض الخـلايا البنوية بسرعـة كبـيرة، ينتج عن هذا النمو دفع باقي الخلايا لأعلى بداخل الاندوسبرم الغني بالغذاء، إذ يمد الاندوسبرم الجنين بالمواد التي يحتاجهافي نمواته التالية (الشكل ١٨-٤).

وماذا ينجزه الانشقاق في نشوء الكائن؟ أولا، فهو ـ أي الانشقاق - يزود الكائن بمخـزون من الخلايا التي يتكون منها الجنين. إذ كما رأينا، فان الخلايا هي الوحدة التركيبية لكل الكائنات الحية، كما يهيء الانشقاق المدد اللازم من تلك الخلايا. وثانيا، يهيء الانشقاق علاقة عادية بين النواه وبين السيتوبلازم. وحتى البويضات الصغيرة فانها تعتبر كبيرة إذا ما قورنت بأنواع أخرى من الخلايا، فحجم بويضة الضفدعة اكبر ١,٦ مليون مرة من حجم خلية الضفدعة العادية، لكنها - أي البويضة - تحتوي كذلك على نواه واحدة. وأثناء عملية الانشقاق تنتج الاف من الانوية بطريقة الانقسام الغير مباشر، تصبح كل من تلك الانوية داخل خلية ذات أبعاد عادية. ويجب أن تتذكر أن بلاستولا الضفدعة بخلاياها التي تقدر بآلاف ليست اكبر حجما من الزيجوت الاصلي.

١٨-٣. التشكل التركيبي (المورفولوجي) MORPHOGENESIS

لا ينتهي انقسام الخلية بطور البلاستولا، ففي الضفدعة تستمر الخلايا الاصغر والاغمق الموجودة عند القطب الحيواني في الانقسام السريع الغير مباشر ، وبزيادة عدد

هذه الخلايا تبدأ في الهجرة لاسفل فوق الخلايا المملوءة بالسائل للقطب الخضري ، كما تبدأ كذلك بعض خلايا القطب الخضري في الهجرة وتدفع نفسها الى داخل الكتلة الخلوية ، محدثة انخفاضا هلاليا صغيرا يعرف باسم البلاستوبور (الشكل ١٨-١). وانـدفاع الخلايـا للداخل هذا ينبيء بابتداء ظاهرة الانبعاج (Gastrulation) وهجرة خلايا القطب الحيواني الى اسفل فوق سطح الكتلة الخلوية يدفع عدد كبيرا من هذه الخلايا المهاجرة نفسها الى الداخل عند منطقة البلاستوبور.

وتتحول الخلايا المحتضنة من خلايا القطب الخضري الى لوح من الخلايا التي تنمو لاعــلى ومــا تلبث أن تحيط بفـراغ أو فجــوة، تسمى اركنتــيرون (Archenteron) (الشكل ١٨-١ ج)، اللوح المكون من الخلايا المذكورة هو خلايا اندودرمية أي داخلية (Endodermal) وينشــأ من الاركنتيرون كذلك القناة الهضمية، الكبد، غدد الهضم الاخرى، بعد التطور، الرئات. وعند هذا الطور من النشوء، تنشأ الفتحة الوحيدة الموصلة للاركنتيرون عند البلاستوبور، كما سيتكون في هذا المجال فيما بعد فتحة الشرج والبطانة الداخلية لكل تلك الاعضاء ستتكون من الخلايا الاندودرمية الاتية مباشرة من خلايا القطب الخضري الاوائل.

أما عن خلايا القطب الحيواني النامية لاسفل فوق الجنين، فهي كذلك تهاجر الى الداخل، تحدث هذه الهجرة أولا عند المنطقة العلوية (أو الظهرية) من البلا ستوبور. وتتحرك تلك الخلايا مباشرة للداخل تحت خلايا القطب الحيواني التي توجد بأعلاها. وتسمى تلك الخلايا عندئذ بالخلايا الميزودرمية أي الـوسيطة (Mesodermal) والتي منها ينشــأ عضــو يشبــه القضيب، هو الحبل الظهري (Notochord) والذي يجري طوليا على امتداد الجانب العلوي للجنين الناشيء.

وباستمــرار عملية الانبعاج السابق ذكرها، تتزاحم خلايا القطب الحيواني في الــداخــل حول الحافة الكلية للبلاستوبور وتصبح تلك الخلايا المتزاحمة ايضا خلايا ميزودرمية، وتترتب الخلايا الأقرب للحبل الظهري في كتل منفصلة تسمى حلقات (Somites) التي ستنشــأ منها العضلات والعظام في العمود الفقري، اما عن الخلايا الميزودرمية الأقرب الى السطح البطني للجنين ستتكون منها بطانة السيلوم (Coelom) وهــو فراغ الجسم الـرئيسي. أما عن السيلوم نفسه فينشأ من انفصال هذا الميزودرم

(الشكل ١٨-١ ج). ويطلق على هذا الطور من النمو بطور سدادة المح Yolk-Plug إذ أنه مازال هناك قرص Disc صغير من خلايا المح موجود في الخـارج . أمـا عن خلايـا القـطـب الحيـواني والتـي لـم تهاجـر للداخـل فتسمـى بالخـلايـا الاكتودرمية أي الخارجية (Ectodermal) ومنها تنشأ كل مكونات الجهاز العصبي وكذلك جلد الحيوان.

وبعد تكوين الحبل الظهري بقليل، تقوم الخلايا الاكتودرمية الموجودة فوقه مباشرة بعـدة انقسامات خلوية سريعة، ينتج عنها طبقة مسطحة عميقة من الخلايا تسمى بالصفيحة العصبية. وتنمو بعد ذلك حواف تلك الصفيحة العصبية لأعلى بينما ينضغط الجزء الوسطى منها والموجود فوق الحبل الظهري مباشرة. ويطلق على هذا الطور من النمو بطور تكوين الثنيات العصبيـة (Neural Folds) (شكل ١٨-١ ح) والذي يتبعه تكوين الانبوبة العصبية. وينمو زوج الثنيات الملتوية علويا لأعلى ويتحدان سويا طوليا لتكوين الانبوبة العصبية التي تحيط بالقناة العصبية وينشأ من هذا التركيب المخ والحبل الشوكي. ويوضح شكل (١٨/١ ط) وجود ثلاثة انتفاخات من تلك الانبوبة العصبية عنـد الـطرف الأمامي للجنين، ستصبح هذه الانتفاخات فيما بعد المخ، ثم تسقط الانبـوبـة العصبية لاسفل في الجنين وتغطى بطبقة أخرى من خلايا الاكتودرم والتي ستصبح فيما بعد الجلد.

ولو أن تفاصيـل تكوين الانبعاج (Gastrulation) السابق ذكرها تختلف كثيرا من نوع الى اخر، فان هذه الاختلافات سطحية وليست جوهرية. وفي كل حالة، ينتج عن عملية الانبعاج هذه تكوين ثلاث طبقات أولية (تسمى في الغالب بالطبقات الجرثومية Germ layers) هي الاكتودرم والميزودرم والاندودرم، ينشأ من تلك الطبقات الجرثومية الاعضـاء والاجهزة المختلفة لجسم الانسان. ويدون الشكل (١٨-٥) قائمة بمنشأ الطبقات الجرثومية للأعضاء والأجهزة المختلفة في جسم الانسان، يمكن استخدام نفس القائمة لكل حيوان فقاري.

وتعتـبر عملية الانبعـاج مصدر تكوين الشكل الأساسي للجنين، فتتجمع الخلايا في أمـاكن محددة لتكوين الانسجة والاعضاء والاجهزة المختلفة للكائن. ويتعدي هذا التكوين بكثير مجرد تجمـع الخلايا فقط في الثلاثة طبقات المذكورة. ولابد للخلايا الغير متخصصة في الاكتودرم والميزودرم والاندودرم من أن تأخذ جميعها أشكالا متخصصة

الشكل ١٨-٥ . منشأ انسجة الجسم المختلفة من الطبقات الجرثومية

اكتودرم	ميزودرم	اندودرم
- الجلد، الشعر، الأظافر	- العضلات	- بطانة القناة الهضمية
- كل الجهاز العصبي بما فيه الخلايا العصبية المستقبلية	- الدم والاوعية الدموية	- بطانة القصبة الهوائية، الشعب الهوائية، الرئات
- النخاع الادرينالييني (Adrenal medulla)	- النسيج الضام بمافيه العظم	- بطانة القناه البولية والمثانة
	- الكلي - الحوالب	- الكبد
	- الخصي - المبايض قنوات المبيض - الرحم - الأمعاء	- البنكرياس
	- الجهاز الليمفاوي	

وتنظيما داخليا يسمح لها بالقيام بوظائف الانسجة والاعضاء التي وجدت بها تلك الخلايا الغير متخصصة. ويطلق على هذا التحول من خلايا غير متخصصة الى خلايا متخصصة تعبير التباين أو التميز Differentiation.

١٨-٤ . التباين (التميز) DIFFERENTIATION

ولو أن الاطوار النهائية للتشكل و كذلك عملية تباين (تميز) الخلايا تتداخل لدرجة كبيرة، فيجب عندئذ أن نضع في الحسبان الفرق بين العمليتين. فالتشكل يشمل ترتيب الخلايا في الطبقات المختلفة والمجاميع والتي ستكون تراكيب الجسم، كما يشمل التشكل كذلك انقسام الخلايا وتحركها الفعلي من مكان الى أخر داخل الجنين. ولو أن أمام الطبقات المختلفة من الخلايا في انبعاج الضفدعة قدر محدود ومختلف، إلا أنها لا تظهر في مبدأ الامر هذه الاقدار بأي نوع من التخصص في التراكيب أو الوظيفة. وفي الحقيقة، فأنه من الممكن زرع خلايا من مكان في مكان أخر في الطور الأول للانبعاج

(جاسترولا)، وتكيف تلك الخلايا المنزرعة نفسها بسرعة في مكانها الجديد وتشارك في بناء العضو المناسب لها.

وباستمرار النشوء الجنيني، على ايه حال، فان خلايا الجنين الناشيء تصل الى نقطة اللاعودة، إذ أنها تصبح مسئولة عن تكوين نوع معين من الخلايا وبالتدريج فأنها تأخذ مظهر ووظيفة أنواع الخلايا المختلفة التي تم شرحها في الباب الخامس. وبمجرد عملها هذا، فان كل خلية تبـدأ في تخليق عدد صغير من البروتينات المميزة لهذا النوع من الخلايا، وليس لأي نوع آخر.

وتبـدأ الخـلايا المتبـاينة لعضلات القلب في تخليق بروتين خاص قابل للانقباض يسمى ميوسين (Myosin) القلب، كما تبدا خلايا الدم المتباينة في تخليق الهيموجلوبين. وعند تباين خلايا النسيج الضام، فانها تصبح مسئولة عن تخليق الكولاجين وبروتينات أخرى خارج الخلايا، هكذا. وتبدو المسئولية عن حدوث قدر معين وكانها تحدث اولا في الميزودرم والاندودرم، ثم بعد ذلك في خلايا الاكتودرم.

ولـو انـه يمكن تميز عمليات التشقق، التشكـل، التبـاين الخلوي من بعضهـا البعض، الا أن تلك العمليات الثلاث تشترك في شيء واحد متشابه وأساسي. ففي كل حالة، نجد ان الاشياء الغير متشابهة تتكون من أشياء متشابهة. فخلايا القطب الحيواني في جنين الضفدعة المبكر تختلف في المظهر والتركيب الكيميائي عن مثيلاتها في القطب الخضري، فينتج من الكرة المجوفة للبلاستولا ثلاث طبقات جرثومية واضحة، يتكون من الخلايا الغير متخصصة في الثلاث طبقات الجرثومية جميع الخلايا المتباينة للكائن البالغ.

وفي كثير من الحالات، يحدث التباين مبكرا مرة واحدة في عمية النشوء. وعلى سبيل المثـال، ربما لا يمكن حدوث تباين اكثر للخلايا العصبية بعد الطفولة، في حالات أخرى، يستمر التباين طوال الحياة، تستبدل الأنواع المتعددة من خلايا الدم باستمرار طوال العمر. ويوجد دليل واضح على أن جميع كرات الدم (الخلايا الحمراء، الخلايا الليمفـاوية، الخـلايا المتعـادلة، غيرها) تتكون من خلية بدائية واحدة تسمى خلية الأصل (Stem cell) وينتج الانقسام المباشر لتلك الخلايا الأصلية (الموجودة في نخاع العظام) خلايا الابنة والتي يواجهها أحد امرين، فالبعض منها يبقي كخلايا أصلية،

للتأكد من مورد دائم للخلايا الاصلية لا يستهلك أبدا، والبعض الاخر يدخل في ممر آخر من التباين، بسيرها في تلك الممرات، فانها تأخذ التركيب والوظيفة والبروتين المميز للخلايا التامة التباين والتي ستصبح عليها في النهاية (الشكل ٥-٢٧).

وتجعلنـا عملية التباين هذه نتساءل عن تباين العمل الجيني. وبكل تأكيد، فان الجينـات اللازمة لبناء جميع الخلايا المتباينة في جسم الانسان البالغ لابد وأن تكون موجـودة في البيضـة المخصبة. إذا كيف تتحول جينات معينة الى خلايا معينة (مثل جينات سلاسل الألفا والبيتا في الهيموجلوبين) بينما تذهب جينات أخرى الى خلايا أخرى؟ وكيف اذن انه كلما تقدم النشوء كلما نتجت خلايا غير متشابهة من خلايا كلها متشابهة؟

وتوجد لذلك إجابه واحدة معقولة وهي أنه عند كل انقسام غير مباشر، فان بعض الجينات تذهب كلها الى خلية واحدة ابنة، والبعض الآخر لخلية ابنة أخرى. وبهذه الطريقة، فان أغلب المجموع الجينـي (Genome) الموجود في البويضة المخصبة يتكسر تدريجيا ويتوزع على الخلايا المختلفة في الجسم. وبهذا فان خلايا عضلة القلب تتلقى فقط الجينات التي تحتاج اليها لاداء وظائفها، منها الجينات التي تلائم تخليق ميوسين القلب. والخلايا التي ستصبح خلايا دم حمراء مثلا تتلقى، مع غيرها، الجينات اللازمة لسلاسل الفا وبيتا الهيموجلوبين. وبينما تبدو هذه نظرية معقولة جدا لشرح التباين والنشاط الجيني التبايني الذي يجب أن يصاحبه، فانه توجد كمية كبيرة من المعلومات ترجح خطأ تلك النظرية. وعلى العكس من ذلك، فالدليل يقودنا الى خلاصة مختلفة تمامـا: وهـو على وجه الخصوص، أن كلا من الخلايا المتباينة في الجسم تحتفظ بكل المجموع الجيني (الجينوم) الذي كان موجودا في البويضة المخصبة. دعنا عندئذ نختبر هذا الدليل فيما يلي:

٥-١٨. الدليل على أن الخلايا المتباينة تحتفظ بكل المجموع الجيني

EVIDENCE THAT DIFFERENTIATING CELLS RETAIN THE ENTIRE GENOME

١ ـ محتويـات الـ (DNA) في الخلايا المتباينة (المميزة)

THE DNA CONTENT OF DIFFERENTIATED CELLS

توجد طرق دقيقة لتحديد محتويات كل خلية من (DNA) فاذا ما طبقت تلك الطرق

على الانواع المختلفة من الخلايا المتباينة، يظهر لنا شكل واضح (الشكل ١٨-٦) ومع قليل من الاستثنـاءات الصغيرة واستثناء واحد كبير، فان الخلايا المختلفة في الجسم تحتوي على نفس الكمية من (DNA). والاستثناءات الصغيرة هي الخلايا العرضية (في الكبد، على سبيل المثال) والتي هي من النوع رباعي الكروموسومات، التي بها ضعف العـدد الـطبيعي من الكـرومـوسـومـات. وتنشـأ تلك الخلايا الرباعية نتيجة ازدواج الكروموسومات والانقسام بدون حدوث انقسام في الخلايا. أما الاستثناء الرئيسي فهو الجاميطات، إذ أنها تحتوي على نصف الـ (DNA) الموجود في الخلايا الاخرى (الشكل ١٨-٦) وذلك لنشوئها عن طريق الانقسام الاختزالي، هذا دليل معقول تماما.

شكل ١٨/٦ : وزن (DNA) في أنوية خلايا مختلفة في الابقار، مقدرة بالبيكوجرامات (١٠^-١٢^ جرام) لكل نواة.

الكبد	٦,٤
اطحال	٦,٨
الغدة التيموسية	٦,٤
البنكرياس	٦,٦
الحيوان المنوي	٣,٣

٢ ـ المحتويات الكروموسومية في الخلايا المتباينة

THE CHROMOSOME CONTENT OF DIFFERENTIATED CELLS

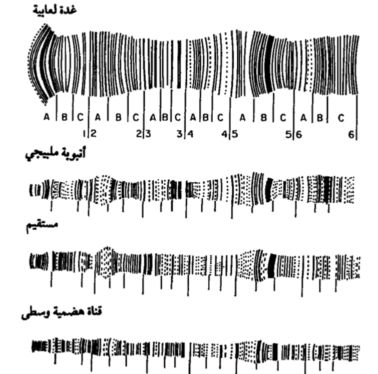
مع تقدم وسائل تحاليل الخريطة الكروموسومية (Karyotype) أصبح الان واضحا ان (و كذلك مع بعض الاستثناءات القليلة) الخلايا المتباينة المختلفة لأي كائن تتقاسم نفس العدد من الكروموسومات. واختبـر العالمان ت. ت. باك (T. T. Puck)، ج. هـ. تيجيو (J. H. Tjio) [واللذان زودانا بإحدى هذه الصور الميكروجرافية الموجودة في الشكـل (١١-١٠)] الخرائط الكروموسومية في ١٨٢٥ خلية فردية مأخوذة من ثماني أنسجة مختلفة من أنسجة الانسان. وفي كل حالة تقريبا، كان عدد الكروموسومات متســاوي: ستــة واربعــين (٤٦)، وخلية واحــدة فقط من المجمـوعـة كان عدد

كروموسوماتها (٤٥)، خلية أخرى (٤٧) كروموسوم. علاوة على ذلك، وجدت خلايا قليلة (مثل بعض الخلايا في الكبد) من النوع رباعي الكروموسومات (٤ن) (والتي تم شرح وجودها في الصفحـة السـابقة). وأن تحليل الخريطة الكروموسومية في العديد من الانواع الاخرى هي القاعدة العامة وهي أن الكروموسومات في العادة لاتفقد أثناء النشوء أو التباين.

٣ ـ كروموسومات البوليتين POLYTENE CHROMOSOMES

تمت دراسة كروموسومات البوليتين (العملاقة Giant) بالتفصيل والموجودة في كثير من خلايا يرقات الذباب في الباب الخامس عشر ولقد فحصنا الدليل على أن كل شريط (Band) في تلك الكروموسومات يمثل موقعا جينيا.

والمهم في الجدل الحالي هو أن المظهر العام للكروموسومات العملاقة - بما فيها تتابع ٥٠٠٠ شريط ـ هو نفسه مهما كانت الخلية التي أخذت منها تلك الكروموسومات (الشكل ١٨-٧). وقد تنتفخ بعض مناطق الكروموسومات في نوع واحد من الخلايا،



شكل ١٨-٧. أجزاء متساوية من الكروموسومات في حشرة الهاموش Chironomus tentans كما تظهر في أربعة أشكال مختلفة من الخلايا في الحشرة. الاختلافات في مظهر الأشرطة ربما تعكس الاختلافات في النشاط الجيني في الخلايا المختلفة (من عمل بيرمان، بتصريح من شبرنجر - فيرلاج).

ومناطق أخرى غيرها تنتفخ في أنواع أخرى من الخلايا. وفي الحقيقة، فنحن مقتنعون بأن الانتفاخات المعينة هذه في نوع محدد من الخلايا المتباينة تعكس نشاطا جينيا مكثفا يميز تلك الخلايا لكن، حتى في عدم وجود الانتفاخات، فان كل الحلقات - ومعنى هذا كل الجينات - تكون موجودة في كل خلية.

٤ ــ قابلية التشكل في خلايا النبات للإنعكاس

THE REVERSIBILITY OF DIFFERENTIATION IN PLANT CELLS

توجد إجابة مباشرة لسؤالنا في الشكل (١٨-٨)، إذ انه اذا زرعت خلية متباينة من جذر نبات الجزر في بيئة زراعية مناسبة، تبدأ تلك الخلية في الانقسام المتتابع، فاقدة تركيبها التبياني بفعلها هذا، ثم تبدأ الخلايا الناشئة عنها في التباين، وأخيرا تكون تلك الخـلايا كل الاعضـاء التي يتكون منها نبات جزر كامل. وبالتاكيد فان تلك الخلية المتباينة من جذر النبات لم تفقد أي مجموع جيني (جينوم) للنوع، ولو أنه قبل إجراء التجربة، لم تحتاج الخلية المذكورة إلا إلى الجزء من النبات الذي يماثل تركيب ووظيفة خلية الجذر. وربما لو وضعت أي خلية متباينةمن أي نبات في وسط يشابه ذلك الموجود في الانــدوسـبرم (الشكـل ١٨-٤)، يمكنهـا أن ترجـع إلى الشكـل الجيني وتمتلك كل القدرات الجينية المميزة لنوعها إذا ما تركت حرة.

اختبار قدرة الانوية على نشوء البرمجة

TESTING THE CAPACITY OF NUCLEI TO PROGRAM DEVELOPMENT

إن الموقف غير واضح جيدا بالنسبة الى الحيوانات. ومن أوائل التقرب من السؤال العمل على الفصل الطبيعي للخلايا الناشئة في الاطوار المبكرة لعملية الانشقاق، إذ أنه من المعروف أن كلا من الخليتين الناتجتين عن قيام زيجوت الضفدعة بأول انشقاق له تعطي نصف الجنين. وقد يعتقد المرء بطريقة أو بأخرى أن كلا من هاتين الخليتين قادرة على استخدام نصف جينات الكائن فقط، لكن الفصل الطبيعي للخلايا يظهر، على أي حال، أن هذا ليس هو الواقع، اذ أنه عند تربية كل خلية على حدة تستمر كل منهما على اعطاء جنين كامل ولو انه اصغر حجما.

ويمدنا هذا الاكتشاف بتوضيح سبب وجود توائم متشابهة، هي التوائم التي تعطي



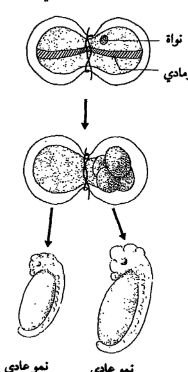
شكل ١٨-٨. نبات الجزر في دورق نما من خلايا جذور كاملة التشكل والتي تم عزلها وترغيبها في القيام بالانقسام الغير مباشر (بتصريح من روي دي كارافا، سيانتيفيك أميريكان).

تشابها مذهلا بين بعضها البعض. والتوائم المتشابهة دائما ماتكون من نفس الجنس، قد نجد أن هذا التشابه يكون أيضا في كل شيء حتى في كيميائية الجسم. ويمكننا تصديق ذلك إذ أن تلك التوائم المتشابهة تأتي من زيجوت واحد، الذي أنفصل الى جزئين بعد حدوث انشقاق أو انشقاقين. وبدون شك، فان الثلاثة أو اربعة أو خمسة توائم تنشأ بنفس الطريقة. والتشابه المذهل لهذه الافراد يمكن تفهمه إذا تأكدنا أنهم تكونوا جميعا من زيجوت واحد أي مجموعة واحدة من الجينات.

وعند تكرار تجربة فصل الخلايا وهي عند طور الاربعة خلايا من الانشقاق كانت النتائج مختلفة - تماما، إذ لم تستطيع أي خلية من الخلايا الاربعة عند فصلها أن تعطي جنينا كاملا. ماذا حدث إذن؟ هل فقدت الانوية البنوية (Daughter nuclei) التي انتجت أثناء الانشقاق الثاني بعضاً من جيناتها الازمة لتكوين كل الكائن؟ اكتشف الاجابة على هذا السؤال عالم الاجنة التجريبي الالماني هانز سبيمان (Hans Spemann) إذ استخدم هذا العالم خيوطا رفيعة من شعرة طفل، وحاول عمل اربطة متينة حول البويضات المخصبة حديثا (والتي تماثل بيضة الضفدعة)

بحيث تصبح كل بويضة منضغطة طوليا من وسطها الى نصفين، مع انقسام الهلال الرمادي الى نصفين كما هو واضح في الشكل (١٨-٩). وكانت نواة الزيجوت في أحد النصفـين، وبقي النصف الاخـر بدون نواة ولكنـه كان على صلة بالنصف الاخـر المحتوي على النواة بقنطرة ضيقة من السيتوبلازم. ولقد وجد سبيمان أن نصف البيضة المحتوي على النواة هو الذي يقوم بعملية الانشقاق. وعلى أيه حال، فانه عند نقطة معينة أثناء الانشقاق، تنتقل النواة عن طريق قنطرة السيتوبلازم الى النصف الاخر، وبمجرد حدوث ذلك، يبدأ هذا النصف الاخر في الانشقاق ايضا، ومع ذلك، كانت نواته نتيجة لعدة انشقاقات سابقة (قد يبلغ عددها خمسة انشقاقات)، ثم يستمر هذا النصف الاخـر في تكوين جنين كامل. وواضح أذن، أن النواه، عند طور الاثنين والثلاثين (٣٢) خلية على الاقل، لم تفقد أيا من جيناتها لتكوين الكائن (الجنين).

وحديثا، أجريت محاولات عدة للاجابة على السؤال الخاص بوسائل تجارب زرع الانويـة. باستخـدام موجهـات دقيقة (Micromanipulators) مجهزة للعمل على خلية واحـدة، نجـح العالمان روبرت برجز (Robert Briggs) وتوماس كنج (Thomas King) في فصل الانوية من خلايا اجنة الضفدعة في أطوار مختلفة من النمو. ولاختبار مقدرة هذه الانـوية، قام العـالمان بزراعتها في بيض ضفدعة غير مخصب والتي نزعت منها

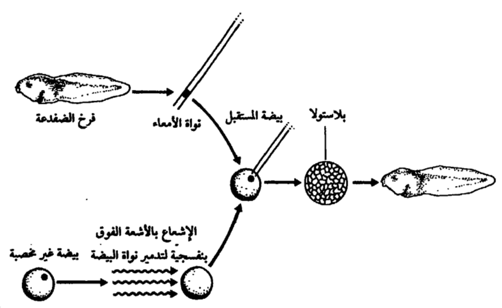


الشكـل ١٨-٩. تجربـة سبيـمان. السيتـوبلازم الى يسار العقدة لم يستقبل نواة الى أن قامت نواة الزيجوت الرئيسية بعدة انقسامات غير مباشرة. ومع ذلك، عندما انشقت نواة نهائيا، فنصف البيضة هذا استمر في النشوء عاديا. وهذا دلالة على أنـه لم تفقـد أي جينات أو لم تنشط عكسيا أثناء الانقسامات الغير مباشرة المبكرة

انويتها. ، وبهذه الطريقة، أمكن تحديد ما إذا كانت نواة من الاطوار الاخيرة من النمو الجنيني عندهانفس مقدرة نواة الزيجوت أو نواة خلية الانشقاق المبكر. وأمكن بسرعة معـرفـة أن الانـوية المأخوذة من بلاستولا الضفدعة مازالت تحتفظ بكل قدرات نواة الزيجوت كما تم معرفة أن نواة أي خلية من الاف الخلايا الموجودة في بلاستولا الضفدعة تعمل ايضا على بدء النشوء (النمو) العادي تماما اذا مازرعت في بيضة ضفدعة فقدت نواتها.

ويمكن تفهم هذا لوجـود دليل جيد الان على أن كرومـوسـومـات الخـلايا أثناء الانشقاق لم تبدأ بعد أيه وظيفة فيما عدا تضاعفها أثناء مابين أطوار تكرار الانقسامات الغير مباشرة. وكل الضوابط على نشاطات خلايا الانشقاق تبدو وكانها ناتجة بسبب الرسائل الكثيرة لجزيئات (RNA) والريبوسومات والتي وضعتها الام في البويضة الغير مخصبـة أثنـاء عملية تكـوين البيضـة (Oogenesis) وبعبـارة أخـرى تبـدو الجينات التـي زود بها الاب حيواناتـه المنويـة وكانهـا لا تلعب أي دور اثنـاء الانشقاق، ولكن فقط عنـد ابتداء عملية الانبعاج (Gastrulation) ، وتبدأ الانوية في صنع ريبوسومات جديدة وفي تخليق (RNA) قوي - مستخدمة في ذلك رموزا من الام ومن الاب (وربما لا تنطبق هذه القصة على الثدييات، اذ أنه يوجد دليل على أن جينات الاب تبدأ في إظهـار تأثيرها في وقت مبكر مثل وقت حدوث الطور الثنائي الخلية أي طور تكوين الخليتين في الانشقاق في الفأر).

وعندما كرر برجز، كنج تجاربهما باستخدام أنوية من الاطوار المتأخرة في الجنين، أمكنهما الحصول على نتائج مختلفة تماما، إذ كانت تلك الانوية قادرة أيضا على تنشيط عملية نشوء الجنين ولكن مع درجات واسعة مختلفة من النجاح المنتظر، إذ ان الكثير من الاجنه الناتجة توقفت عن النشوء في طور أو في آخر. علاوة على ذلك فان الاجنة التي استطاعت تكملة نموها كانت مشوهة في الغالب وهذا الدليل يجعلنا نقترح بأنه أثناء الانبعاج تتغير الانوية. لقد شاهدنا في الباب الرابع عشر أنه أثناء عملية التباين في خلية مفرزة للاجسام المضادة، فان جيناتها التي ترسل اشاراتها الى الجسم المضاد «تقفز» الى مكان أخر في المجموع الجيني (الجينوم) ولا يمكن ارجاع هذه القفزة ثانية. واذا ما أظهر بحث أخر يثبت وجود ظاهرة عدم العودة في حالات اخرى من حالات التبـاين خاصـة باعادة ترتيب الجينات، فيمكن إذن للتباين أن يحدث كبتا مستديما



الشكل ١٨-١٠. طريقة زرع النواة. تسحب نواة من خلية واحدة (في هذه الحالة في الأمعاء) وتزرع في بيضة ثم تدمير نواتها بالاشعاع. وحتى ولو أنها أخذت من خلية تامة التشكل، فالنواه كانت قادرة على برمجة نمو عادي للبيضة الى فرخ الضفدعة.

لاجزاء من المجموع الجيني. ومن جهة أخرى فان الفشل المتكرر لانوية الجاسترولا لعمل برنامج عادي للنشوء ربما يعكس ببساطة فشلا لاحدى طرق التجارب وليس بسبب صفــة متغيرة للأنوية. هذا وقد أمكن للعالم جوردون (Gurdon) في تجاربه مع ضفدعة جنوب افريقيا المخلبية *Xenopus laevis* – في نسبة متواضعة من الحالات – أن ينشيء (يكون) فرخ ضفدعة (Tadpole) من بيضة استبدلت نواتها بنواة أخرى أخذت من خلية متباينة تماما من أمعاء فرخ ضفدعة أخرى (شكل ١٨-١٠). ولربما، حينئذ، أن الانوية المأخوذة من خلايا غير منقسمة وكاملة التباين، تكون ببساطة أكثر عرضة بكثير للضرر أثناء التجــارب، ولا يمكن كبت عدم إبطال تأثيرها.

ويبدو أن كروموسومات خلية الدم الحمراء في الكتكوت مكبوتة على الدوام حيث أنه لم يكتشف أي أثر لتخليق (RNA). وعلى ايه حال، إذا ما أدخلت نواة الخلية الحمراء للكتكـوت في سيتـوبـلازم خلية حيوان ثديي نشـطة في عمليات تمثيلهـا الداخلي، باستخـدام طريقة تهجين الخلية الجسمية (انـظر قسم ١١-٨)، فانه يمتنع كبت الكروموسومات التي تصبح نشطة مرة أخرى في تخليق (RNA).

وبـأخـذ كل هذا مجتمعـا، تظهر كل الدلائل على أنه أثناء النشوء الجنيني، فان

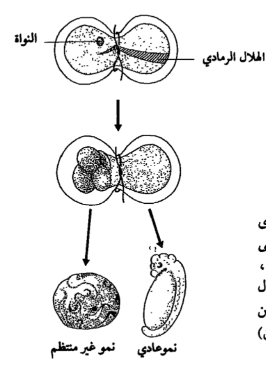
الجينات لا تطرد للخارج الى الخلايا التي ستدخل في ممرات مختلفة من التباين، إذ بدلا من ذلك، فان كل خلية متباينة (مع وجود استثناءات قليلة جدا) تحتفظ بكل المجموع الجيني الذي كان موجودا في البويضة المخصبة. إذن ماهي الوسيلة البديلة التي يمكن الرجوع اليها لشرح ظاهرة التباين في الخلية؟ ومرة أخرى، فنحن نواجه مشكلة تباين النشاط الجيني. ولقد اكتشفنا في الباب الخامس عشر عوامل معينة (هورمونات) يمكنها تشغيل وإبطال (فتح وقفل) عمل الجينات في الخلايا المتباينة، وسميت هذه العملية باسم تعـديل Modulation". فهل يمكننا الان ايجاد عوامل يمكنها بالاختبار تشغيل وإبطال الجينات عندما تدخل الخلايا التي تحتوي على تلك الجينات ممرا أو آخر من ممرات التباين؟

١٨-٦. العوامل السيتوبلازمية التي تؤثر على تعبير الجينات أثناء التباين أو التميز:

CYTOPLASMIC FACTORS AFFECTING GENE EXPRESSION DURING DIFFERENTIATTION:

ان من أوائل الاكتشافات الدالة على وجود عامل يؤثر في التباين (التميز) هو الذي تمت معرفته من التجارب التي أجريت على الخلية و التي قام بها سبيمان (Spemann) وتم منـاقشتها في القسم السابق (أنظر الشكل ١٨-٩). وعندما كرر سبيمان تجاربه مع البيضة المخصبة المنبعجة من وسطها بحيث يقع كل الهلال الرمادي في نصف البيضة، كانت النتيجة مختلفة تماما (الشكل ١٨-١١) إذ بدأ النصف الخالي من الهلال الرمادي والمحتوي على النواة في الانشقاق مباشرة، ومع ذلك لم يتعـد نموه أبعد من كتلة غير منتظمة من الامعاء، الكبد، وبعض الخلايا البطنية. أما عن النصف الاخر، ولو أنه خال من النواة إلا عند الانقسام الرابع الغير مباشر في الجانب المنشق، فقد استمر في تكوين جنين عادي متكامل. ويعتبر هذا دليل أيضا على أن الأنوية هنا في طور الستة عشر خلية (١٦)، لم تفقد أيا من جيناتها. ولكن لماذا إذن، فشل جنين عادي في النشوء (النمو) على الجانب الموجود به نواة الزيجوت؟

ولقـد رأينا بالفعل أن توزيع السيتوبلازم، الميتوكوندريا، RNA ، الريبوسومات، المـخ، في بيض البرمائيات ليس متماثلا. فبعد الاخصاب بقليل، يهاجر بعض من محتويات السيتوبلازم ويكون الهلال الرمادي. ولربما أن مقدرة النواة على الأداء تنظمه بيئـة السيتوبلازم والذي تجد النواة نفسها في وسطة. وعلى هذا، ففي تجربة سبيمان



الشكــل ١٨-١١. احــدى تجارب سبيمان الأخرى. وحتى أنــه بدأ النشــوء (النمــو) أولا، فالجنــين الـذي ينقصـة الهـلال الرمادي لم يستطع النمو أكثر من كتلة من أنسجة الكرش (البطن) الغير منتظمة.

الأولى، نجد أن كل نصف بيضة احتوى على جميع مكونات البيضة الطبيعية، لأن الانقباض الطولي كان متعامدا على الهلال الرمادي. وعلى ايه حال، فانه في تجربته الثانية، ربما فقد نصف البيضة الذي ينقصه الهلال الرمادي بعض مواد السيتوبلازم الاساسية.

ولـربما توضح أهمية بيئة السيتوبلازم نتائج تجارب فصل الخلايا التي وصفت من قبل. فعند حدوث الانشقاق الاول في بيضة الضفدعة عموديا على الهلال الرمادي (كما يفعل دائما)، فان كلا من الخليتين الناتجتين تحتوي على كل محتويات البيضة العادية. والانشقاق الثاني، على أيه حال، يعزل الهلال الرمادي في خليتين من الخلايا الاربع الناتجة. ولو أن جميع الخلايا تحتوي على انوية مع الصفات الوراثية الكاملة، قد نفترض أن عمل الجينات هو الآن محدد بما يحيط بها من سيتوبلازم والذي وجدت الانوية نفسها بداخلة. ولو أن جميع الانوية متشابهة، إلا أن الاتحاد النووي السيتوبلازمي غير ذلك، وعندنا الان أول دليل وهو الطريقة التي يمكن بها أن تتكون خلايا غير متشابهة من زيجوت واحد.

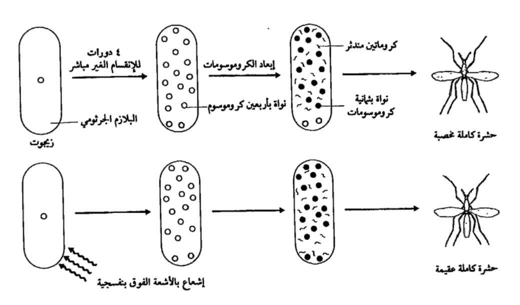
وغياب مقومات تخليق (RNA) قبل الانبعاج في بيضة الضفدعة يمثل مثالا آخر لتأثير

السيتوبلازم على النشاط الجيني للنواة، وعند زراعة أنوية من الاطوار المتأخرة للنشوء الجيني، أو حتى من فرخ ضفدعة صغيرة، في بيض، فانها بسرعة (في خلال ٤٠ دقيقة) تفقد انويتها وتوقف تخليق (RNA). وليس قبل أن توجه تلك الانوية الجنين الى أن يصل الى طور الانبعاج، تبدأ تلك الانوية في استمراريـة تخليق (RNA). وتدل محاولات عزل المانع السيتوبلازمي للـ (RNA) على أنه جزيء صغير نسبيا.

ومن أحد الامثلة الواضحة الدالة على تأثير السيتوبلازم على ماتفعلـه أو لاتفعلـه النـواة موجود في حشرة الهامـوش الصانعة للأورام (Gall Midge). ولعلك تتذكر (قسم ١٨-٢) أن الانشقاق في بيض الحشرات يضم إنتاج أنوية تبقي معلقة داخل المحتويات الغير منعزلة بفواصل في البيضة (الشكل ١٨-٢). وفي الانقسام الرابع الغير مباشر في بيضة الهاموش المذكور، فانه أمكن ثقب اثنين من الستة عشر (١٦) نواة الناتجة في كمية صغـيرة من السيتـوبلازم عند أحد طرفي البيضة (الشكل ١٨-١٢). وفي الانقسام الخامس الغير مباشر، تنقسم هاتان النواتان بطريقة عادية، فتتجـه الخلايا البنوية وبها جميع الكروموسومات (٢ن=٤٠) الخاصة بالنوع، ولكـن لا يحـدث هـذا في الانويـة الاخـرى. وعنـد بلـوغ كل مـن هـذه الخلايـا البنوية طـور المرحلة الانفصالية (Anaphase) فان ٨من الـ ٤٠ كرومـوسوم (المزدوجة Doublets) تنفصل وتتحرك الى الاطـراف المضادة للمغزل، ويبقى الاثنان والثلاثون كروموسوم الباقية في المركز ثم تتلاشي بالتدريج.

أما عن نسل النواتين الطبيعيتين فإنها تتباين (تتميز) أخيرا لتكون الحيوان المنوي أو البويضة، أي البلازم الجرثومي. وبخصوص نسل باقي الأنوية، وهي التي قل عدد كرومـوسـوماتها بشدة، فهي تستمر لتكوين باقي أنسجة جسم الحشرة، أي البلازم الجنسي (وكـانت تلك القصـة ستسعـد العـالم وايزمـان - أنظر قسم ١٠-١). وفي الحقيقـة، إذا ما أتلفت المنـطقة الخاصة من السيتوبلازم الموجودة عند طرف البيضة (وذلك بتعريضها للأشعاع بأستخدام الضوء الفوق بنفسجي) فان الأنوية التي تجد نفسها في تلك المنطقة تنقسم بطريقة غير عادية تماما كأخواتها. وعند بلوغ الحيوان طور النضج، سيكون هذا الحيوان عقيما ولو أنه يبدو طبيعيا في كل شيء أخر (الشكل ١٨-١٢).

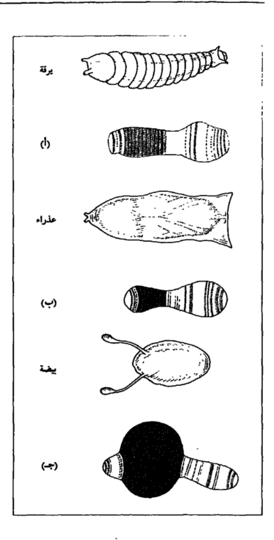
وفـي الجيـنـات الـتي تنشـط أختـياريـا (Selectively) بسـبـب بيئـة



الشكل ١٨-١٢. أعلى: نشوء عادي في هاموش الأورام. الجاميطات مأخوذة من نواتين، كل نواة بالعدد الكامل لمجموعة الكروموسومات الزوجية (Diploids) التي تصبح منفصلة الى كتلة من السيتوبلازم الخاص (البلازم الجرثومي). الأنوية الباقية تفقد ٣٢ كروموسوم قبل الاستمرار في تكوين باقي جسم الحيوان (البلازم الجسمي).
أسفل: تدمير البلازما الجرثومية يجعل الأنوية التي تتحرك هناك قبل قيامها بزوال الكروموسومات أيضا. والحيوان الناشيء يكون عقيا ولكن فيا عدا ذلك عاديا. توضح هذه التجربة أن قدرات النواة تتأثر بالبيئة السيتوبلازمية التي تجد نفسها فيها.

سيتوبلازمية معينة، فلا بد أن نتوقع من النماذج المنتفخة من الكروموسومات العملاقة أن تعكس ذلك. ولقد رأينا من قبل أنه في أي وقت فان نموذج الأنتفاخات في نوع واحد من الخلايا (كما في الغدد اللعابية) يختلف بعض الشيء عن ذلك الموجود في نوع أخر (كما في أنبوبة ملبيجي)، ولربما يكون هذا أنعكاسا لما يحيط بها من سيتوبلازم مختلف. فاذا، على سبيل المثال، ما زرعت نواة غدة لعابية في بويضة (وهي خلية خالية دائما من الكروموسومات العملاقة)، يظهر على الفور نموذج جديد من الأنتفاخات (الشكل ١٨-١٣).

ويشاهد نفس النوع من النشاط في تغير الأنتفاخات أثناء التباين في نوع واحد من الخلايا. وتوضح لنا الصور الثمانية الدقيقة والتي ترى في الشكل (١٨-١٤) كيف أن نمط التحليق (Banding) في نفس المنطقة من كروموسوم عملاق يتغير أثناء عملية



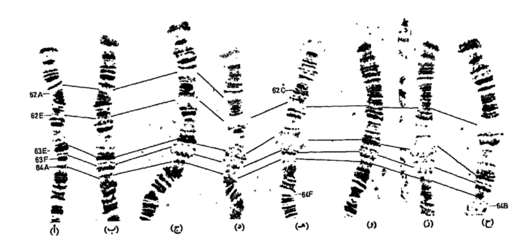
الشكــل ١٨-١٣. تغيرات في مناطق مشابهة من الكـروموسـوم العمـلاق في ذبابة فاكهة (أ) في اليرقة (ب) في العذراء، (ج) عند زرعة في بيضة (البيض ليس به عادة كروموسومات عملاقة). الانتفاخات (Puffs) في الكروموسومات مرتبطة بزيادة الأنشطة.

التباين في خلية غدة لعابية، أي يتغير النمط من ساعة الى أخرى، فالحلقات تنتفخ، وتـرتد وقد تنتفخ ثانية. وهنا، عندئذ، يوجد دليل مرئي على تتابع النموذج للنشاط الجيني أثناء عملية التباين في نوع واحد من الخلايا.

١٨-٧. العوامل الخارجية عن الخلايا و التي تؤثر في تعبير الجين أثناء التباين (التميز):

EXTRACELLULAR FACTORS AFFECTING GENE EXPRESSION DURING DIFFERENTIATION :

أظهرت تجارب سبيمان على البويضـة أن التـوزيع الغير متساوي للمواد داخل البويضة المخصبة يؤدي إلى ظهور خلايا ذات أنصبة مختلفة، بالرغم من تشابه التحكم النووي بها. ولكن هل الجنين الموجود في بيضة الضفدعة المخصبة ذو نموذج متكامل؟



الشكل ١٨-١٤ . التغيرات في نظام الانتفاخات في حلقات متشابهة في العدد ٣ كروموسوم في ذبابة الفاكهة خلال ٢٤ ساعة من النشوء العادي. لاحظ أنه أثناء تلك الفترة، والتي فيها كانت اليرقات مستعدة للتعذير ، تكونت انتفاخات معينة ، ارتدت (انتكست) ثم تكونت ثانية. وعلى آية حال، الترتيب الذي قامت به اختلف كثيرا. وعلى سبيل المثال، في اليرقة، ٦٢ E يصبح نشطا قبل ٦٣ E (ج ، د ،هـ)، ولكن عند بدء التعذير، العكس هو الصحيح (ز ، ح). (بتصريح من دكتور ميشيل أشبورنر، جامعة كمبردج).

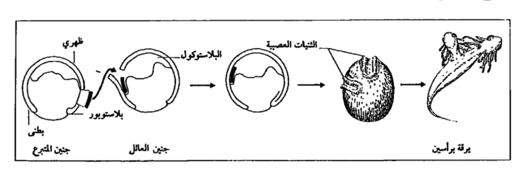
إذا من الصعب تصور أن تكون المكونات البسيطة نسبيا داخل البويضة مسئولة عن كل تعقيدات الهجرة والتباين (التميز) في الخلايا أثناء نشأتها الجنينية. فهل توجد إذن عوامل أخرى متداخلة غير تلك العوامل المتداخلة البسيطة والموجودة بين النواه والبيئة السيتوبلازمية الخاصة والتي تم فصلها (عزلها) عنها أولا؟

كان سببيمان، ثانية، هو الذي بين أن نموذج النشأة في الخلايا يعتمد أيضا على أنشطة الخلايا الأخرى، ولعلك تذكر أنه وجد أنه يمكن لنصف زيجوت جديد النشوء (النمو) بطريقة عادية طالما يتوفر لهذا الزيجوت مايلي: (١) إختوائه على النواه، (٢) إحتوائه على بعض مناطق السيتوبلازم المسماه بالهلال الرمادي، إذ قد عرف سبيمان أن الخلايا التي تنشأ في منطقة الهلال الرمادي هي التي تهاجر عن طريق البلاستوبور أثناء طور الأنبعاج وتكون الحبل الظهري (Notochord). وبمهارة فائقة في الجراحة، نجح سبيمان في فصل خلايا الشفة العليا للبلاستوبور قبل هجرتها للداخل (الشكل ١٨-١٥)، ثم زرع تلك القطعة الصغيرة من النسيج في الجهة البطنية لجاسترولا عادية حديثة. ولتسهيل الأمر لنفسه حتى يمكنه تتبع نصيب عملية الزرع، استخدم الجاسترولا المبكرة لسلالة فاتحة من الجنين المكتمل النمو (Newt) كمتطوع والجاسترولا

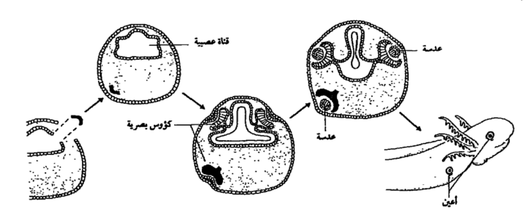
المبكرة بسلالة داكنة كعائل. واكتشف سبيمان أن القطعة المنزرعة في الشفة العليا نمت وأعطت حبلا ظهريا آخر، ثم ظهرت الثنيات العصبية فوق موقع القطعة المنزرعة. وعلى أية حال، كانت كل هذه النموات خلايا داكنة (أي خلايا العائل)، واستمرت في النمو، مكونة أنبوبة عصبية ثم جهاز عصبي مركزي وكانت النتيجة إنتاج وحش ذو رأسين.

وحقيقة أن غالبية أنسجة الرأس الثانية لم تنشأ من الخلايا المنزرعة بل من خلايا العائل، وأعطت تلك النتيجة سبيمان التفكير في أن الخلايا المنزرعة قد غيرت من مسار نمو خلايا العائل الموجودة فوق الخلايا المنزرعة لأنتاج جهاز عصبي مركزي ثان.

ولم يلاحظ سبيمان أي تأثير عندما زرع أجزاء من الجاسترولات بدلا من خلايا الشفة العليا إذ نمـا النسيج المنزرع تبعا لموقعه الجديد. ولأن الشفة العليا فقط للبلاستوبور يمكنهـا أن تؤثـر في تغييـر النشـأة فـي العـائـل فلقـد سمى سبيمـان هـذه الشفـة العليـا للبـلاستوبـور بالمنظـم (Organizer)، رأي أن هـذا المنـظـم ينبـه عمليتـي التشكـل (Morphogenesis) والتبـايـن (Differentiation) بترغيب تكـوين الأنبـوبـة العصبية، وربما ترغب كذلك الأنبوبة العصبية لتكوين أجهزة جنينية أخرى. وعلى سبيل المثال، نحـن نعلـم أنـه بمجـرد نشـؤ المخ، ينشـأ منـه للخـارج كتلتـان مـن النسيـج العصبي، هما الكأسان البصـريان (Optic cups). وبـما أن تلك الكؤوس البصرية موجودة قرب السطح الأمامي للجنين، فان خلايا الجلد الموجودة أمامها مباشرة تتحول لتكون العدسات (الشكل ١٨-١٦)، وتصبح تلك الكؤوس البصرية شبكية المنتج النهائي، ألا وهو الأعين.



الشكل ١٨-١٥. تجارب أخرى للعالم سبيمان. نسيج المتبرع «أبيض» من منطقة الهلال الرمادي نمـا إلى حبل ظهري وشجعت تكوين رأس ثانية على عائلها الرمادي.



الشكل ١٨-١٦ . النشوء الجنيني في عين سلاماندر. يرغب زرع كأس بصري تكوين العدسة في أنسجة عائلها وتنشأ عين اضافية.

ونظرية الترغيب (Induction) هذه توضح بكل سهولة تحول خلايا الجلد إلى خلايا للعدسة. وفي الحقيقة، ليس من الصعب تصور نمو الجنين بأكملة بهذه الكيفية، إذ أن كل مركب يمكن ترغيبه يكون قادرا على ترغيب تراكيب أخرى. والموجات المتتالية من الترغيب يمكن أن تعود إليها عمليات تكوين جنين حيواني كامل ومنتظم النشأة.

وبعد أكتشاف سبيمان هذا بقليل، وجد أن صفات الترغيب في خلايا المنظم تبقى حتى بعد موت الخلايا، مما جعلنا نعتقد أن الترغيب يتم بمرور بعض المواد الكيميائية من المنظم إلى الخلايا المتأثرة. كما كان يظن أن المادة المرغبة تأمر الخلايا المتأثرة كي تنتظم وتتباين بطريقة معينة. وزودتنا هذه الفكرة باجابة مقبولة لسؤالنا عن كيفية نشؤ خلايا مختلفة من زيجوت واحد. ربما ينبه التركيب العجيب لسيتوبلازم منطقة الهلال الرمادي خلايا البلاستولا الناتجة في تلك المنطقة لأفراز منظمات كيميائية خاصة، وبذلك يكون لتلك الخلايا تركيب خاص في الجنين ويمكن أن تصبح «المنظم»، وقد يأمر أنتشار المواد الكيميائية منها الخلايا المتجاورة كي تنمو بطريقة خاصة، وبنمو تلك الخلايا المجاورة فانها بدورها يمكنها أن تفرز موادا مرغبة هي التي ستبرمج التباين في خلايا أخرى، وبهذه الطريقة يمكن بناء كل الجنين.

وبمثل هذه النظرية الجذابة، كان من الطبيعي القيام بكل المجهودات الممكنة لعزل وتعـريف تلك المـواد المـرغبة، ليس فقط في أجنة البرمائيات ولكن في أحياء أخرى كذلك. وفي حالات كثيرة وجد أن الترغيب يمكنه أن يمر في حيز مملوء بالاجار - أجار،

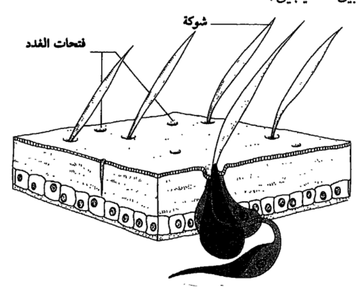
لكنـه لا يمـر في لوح من السيلوفـان. ويدل هذا على تدخـل جزيء كبير نسبيا في الموضوع، في الحقيقة، وأمكن الحصول على الترغيب في بعض الحالات معمليا بمعاملة الأنسحة بمكون بروتيني نقى نسبيا. وقدم بعض العلماء الدليل على أن الريبوبروتين النووي (Ribonucleoprotein) وهو مـركب معقد من (RNA) والبروتين، ربما يكون له تلك الخواص الترغيبية.

ولـو أن أغلب المـواد المـرغبـة تبـدو أنها جزيئـات كبـيرة، إلا أنـه توجـد بعض الأستثنـاءات، إذ أن فيتامين أ، وهو جزيء صغير، يمكنه أحداث (ترغيب) النمو المتغـير في خلايا البشرة في جنـين الكتكـوت. وجزيئـات اخـرى صغيرة مثل بعض الأستيرويدات (Steroids) وحتى صبغة أزرق الميثيلين (وهى ليست من مكونات الخلايا العـادية) يمكنهـا الـترغيب في تكـوين الثنيات العصبية في جنـين البـرمـائيات. والتغيرات الناتجة عن هذا الترغيب الذي تحدثه تلك الجزيئات الصغيرة لا تكون متقنة مثل تغييرات الترغيب الذي تحدثه البروتينات. فأزرق الميثلين يحول ببساطة نمو البشرة إلى الانبوبة العصبية وكلاهما مركبات اكتودرمية. ويمكن للترغيب بالجزيئات الكبيرة، من جهة أخرى، تحويل الخلايا والتى كانت ستنمو إلى مكونات إكتودرمية إلى أنسجة ميزودرمية مثل العضل، بل وحتى إلى أنسجة أندودرمية.

ويبدو كذلك أن تباين الخلايـا يتأثر بمواد مانعة (Inhibitory) تصل إليها من الخلايا المجاورة، فاذا ما وضعت أجنه ناشئة من أجنه الضفادع في بيئات تحتوي على قطع من قلب ضفدعة بالغة، تفشل تلك الأجنة في أنتاج قلب عادي. وبنفس الطريقة، إذا ما ربيت الأجنة في بيئة بها قطعة من مخ ضفدعة بالغة، فانها تفشل أيضا في إنتاج مخ عادي. وهذا ما يجعلنا نعتقد بأن الخلايا المتباينة يمكنها إنتاج مواد تمنع الخلايا المجاورة من التباين بنفس الطريقة. وبكل تأكيد فان هذا هو مايحدث في أعضاء الحيوانات البالغة، فالأنسجة المتباينة تفرز موادا (بروتينات، أو بولي ببتيدات) تسمى شالونات (Chalones) تمنع الأنقسام الغير مباشر لخلايا هذا النسيج. ويسبب الدور الذي تلعبه هذه الشالونات في تصحيح (علاج) الأنسجة، فسنتناول الحديث عن مواد الشالونات بالتفصيل في البـاب التالي، وعما إذا كا نت مواد الشالونات هذه تعمل كمانعات في النشوء الجنيني فستبقى هذه المعلومة للمعرفة فيها بعد. وعلى أية حال، فان مثل هذه الظاهرة تكون هي المسئولة عن الحقيقة الدالة على أنه كلماتقدم النمو الجنيني، كلما

أنفصلت بقوة الأجهزة المتكونة من بعضها البعض، وتكون مسئولة كذلك عن التوزيع المتساوي للوحدات المتكررة في كثير من الأجهزة. وعلى سبيل المثال، فان سطح جسم يرقـة (أي حوريـة) البقة المقبِّلـة (Kissing Bug) وهي بقة الرودنياس (Rhodnius) يكون مغطى بمستقبلات حسية وغدد على مسافات متساوية (الشكل ١٨-١٧). فاذا مادمرت مجموعة من تلك المستقبلات والغدد في منطقة ما على جدار سطح الجسم (على سبيل المثال، بوضع إبرة ساخنة على سطح الجسم) يحدث على الفور تباين لخلايا مجددة في نفس المكان، وتعمل تلك الخلايا المجددة على بناء المستقبلات الحسية والغدد من جديد وبنفس المسـافات العادية فيما بينها. ولا يحدث أن تتكون مستقبلات أو غدد بجانب بعضها البعض مباشرة (أي متلاصقة). ولربما يكون السبب في ذلك أنه كلما تنمو غدة أو مستقبل حسى فانها أي الغدة أو المستقبل الحسى، تفرز مادة مانعة تمنع الخلايا القريبة من أن تنمو بنفس الطريقة.

وأصبح واضحا الأن اكثر من ذي قبل، بأن مسار النمو الجنيني لا يعتمد فقط على ترغيب أو منـع بعض الخـلايا أخرى، بل على التداخلات الموجودة بين مجاميع من الخلايا. وعلى سبيل المثال، فلكى يتباين الميزودرم الموجود في الأطراف الناشئة للجنين فانـه يحتـاج إلى أكتودرم نشط فوقه. وعلى الوجه الأخر، يعتمد التباين المستمر لهذا الأكتودرم على استمرارية نشاط الميزودرم الموجود تحته. لهذا، فلربما لا يعتمد النشوء الجنيني العادى كثيرا على مرور مادة منبهة أو مانعة خاصة من نسيج إلى أخر، بل يعتمد على التبادل المحكم للمواد بين النسيجين.



الشكـل ١٨-١٧. تنمـو كلا المستقبـلات الميكـانيكيـة والغـدد في جدار جســم بقــة الـرودنيـاس على أبعـاد متساوية من بعضها البعض.

ويحتاج نشوء أنابيب كلية الفأر إلى نوعين من الخلايا المتباينة، أحد هذين النوعين هو الذي يصنع الجزء الجامع من الأنابيب، والثاني يصنع الجزء المفرز من الأنابيب. ومن الممكن تنشئة، عن طريق زراعة الأنسجة، الخلايا الجنينية والتي تعطى في العادة كلا من هذه الأشكال المتباينة. وعند نموها بمفردها، فان تلك الخلايا الجنينية تفشل في إعطاء أي شيء، حتى ولو زودت بخلاصة الأشكال الأخرى من الخلايا، ولكن إذا ما سمح للنوعين من الخلايا المتباينة السابق ذكرهما بالنمو سويا، فان كلا منها تستمر في التباين إلى شكلها البالغ، ولايتباين النوعان بنجاح فقط، بل إنهما يستمران في تنظيم نفسيهما ليصبحا أنابيب الكلية المعروفة.

و على العموم، إذا ما تمت زراعة خلايا من نسيجين ليست بينهما أية صلة، فان هذين النـوعـين من الخلايا يرتبان نفسيهما ويتحدان ليكونا أنسجة معروفة، وأمكن تطعيم بعض من هذه الخلايا بنجاح في أجسام بالغة وقامت بوظائفها جيدا.

وتعتمـد قدرة خليتـين متشابهتين على معرفة بعضهما على وجود مواد خاصة على سطحيهما. وكما رأينا من قبل، تهاجر الخلايا الجنينية بكثرة، خاصة أثناء عملية التشكل (Morphogenesis)، وعندما تصل تلك الخلايا إلى مقرها الأخير، فانها تلتصق بخلايا أخرى متشابهة، ولربما بواسطة خاصة اللصق لتلك المواد الموجودة على أسطح الخلايا. وبمجـرد تجاور تلك الخلايا لبعضها البعض تنشأ فراغات (أنظر قسم ٥-٢٤) بين أغشية هذه الخلايا لإيجاد ممرات سهلة تسير خلالها الأيونات، والشحنات الكهربية، والجـزيئـات المعتـدلة الكبر، وبهذا يكون لكل خلية وسيلة لمعرفة ما يحدث للخلايا المجـاورة. ومن الأشياء المشوقة حقا أن خلايا السرطان تنقصها تلك المواد اللاصقة الموجودة على أسطح الخلايا ولا يمكنها التعرف على الخلايا المجاورة أو حتى على ايقاف هجرتها أو انقسامها، وبهذا تنجو من الضوابط التي تنظم الخلايا العادية في الجسم.

ولو أن المواد الموجودة والتي تمر من خلية إلى أخرى قد تكون متخصصة أو عامة في تعليماتها، فانه يبدو من الواضح أن ما تفعله خلية متباينة يكون مبرمجا بواسطة جيناتها نفسهـا، وليس بواسـطة جينات الأنسجة المجاورة. ولقد أوضحت إحدى التجارب والـدراسات التي قـام بها أحد تلامذة سبيمان، وهو أوسكار شوتي (Oscar Schottee) بطريقة حية حقيقة هذه النقطة الهامة.

وليرقة حيوان السلاماندر أسنان عظمية، وعضو توازن على كل جانب من جانبي الرأس. ولفرخ الضفدعة أسنان قرنية وخياشيم خارجية على جانبي الرأس. ولقد أخذ العالم شوتي قطعة من النسيج، والتي ستصبح مستقبلا جلد البطن، من جنين ضفدعة وطعمها أي غرسها في جزء من جنين السلاماندر الذي سيصبح مستقبلا الفم وأعضاء التوازن، فاستمرت قطعة نسيج جنين الضفدعة في النمو جيدا وهي في مكانها الجديد، ولكن ماحدث هو أن الفم الـذي تكون كانت أسنانه قرنية وهي من خواص فرخ الضفدعة، وبدلا من أعضاء التوازن تكونت خياشيم خارجية.

والمادة المرغبة (Inducing) التي يفرزها السلاماندر لابد و أن تكون هي المسئولة عن تحول مصير ماكان يجب أن يكون نسيجا لبطن الضفدعة. وعلى أيه حال، فالتعليمات المعطاه بتلك المادة المرغبة لابد وانها كانت عامة، إذ بدلا من البرمجة لنمو أجزاء السلاماندر، يبدو أنها أصدرت الأوامر للنسيج المنزرع بأن يستخدم جيناته الخاصة، ولو أن ذلك كان أيضا مناسبا للمكان الجديد. لذلك يجب أن نبحث عن التحكم النهائي للتباين ليس في أي نسيج منظم ولكن في النسيج الذي يحدث به رد الفعل نفسه. وإذا ما وضع إنسان في الحسبان العدد الكبير من المواد، حتى الجزيئات البسيطة مثل أزرق الميثيلين، التي يمكنها ترغيب تكوين الثنيات العصبية في جنين الضفدعة، يمكن التأكد في البداية من أن النسيج الذي يحدث به رد الفعل يحتوي على كل المعلومات المطلوبة للتخصص ويحتاج ببساطة إلى بعض المؤثرات الغير متخصصة نسبيا كي يتمكن من فعل ذلك. وبذلك فاننا مازلنا نواجه المشكلة الرئيسية في هذا الباب وهي: ما الذي جعل خلية في عضو ناشيء تعبر عن بعض جيناتها (مثل الجينات المشتركة في بناء الفكوك القرنية أو الخياشيم الخارجية) وليس البعض الأخر (في مثالنا هنا تلك الجينات المسئولة عن جلد البطن)؟

١٨-٨: قابلية التباين للإنعكاس:

THE REVERSIBILITY OF DIFFERENTIATION

وبتقدم النشوء الجنيني، فان مقدرة قطعة نسيج الجنين على تغيير مستقبلها بزراعتها في أماكن أخرى يصبح محدودة، إذ تصبح خلايا هذه القطعة بالتدريج أقل مرونة في جهدها. ولطالما ابتدأت عملية الأنبعاج (Gastrulation) على سبيل المثال، فان خلايا طبقة من أحد الأنسجة لايمكن أن تتبدل عامة إلى خلايا نسيج أخر. وتبدل جهد جلد

البطن إلى أجزاء فم أو إلى عدسة عين (الشكل ١٨-١٦) يتطلب ببساطة التبدل من نوع من أنواع الأكتودرم إلى أخر. وفيما بعد فان عدد التبادلات والقابلة لتباين الخلايا تقل أكثر. وأخيرا، تصبح الخلايا مؤهلة للدخول في مصير نهائي. فاذا ما زرعت تلك الخلايا بعد هذا الوقت، فهي تستمر في النمو كما لو كانت في موضعها القديم، وليس بطريقة مناسبة للموقع الجديد. وعلى سبيل المثال، فأذا ما أزيلت براعم الأطراف من جنين سلاماندر وطعمت (زرعت) على جنين سلاماندر أخر، فان تلك البراعم تكون أرجلا إضافية على العائل، وهذا يحدث حتى لو كانت خلايا برعم الطرف غير واضحة التباين.

وهل يمكن عكس (أي انتكاسة) الأستمرارية في الفقد في جهد الخلايا المتباينة؟ لهذا السؤال في الحقيقة شقين، إذ تدل أعمال برجز، كنج (Briggs & King) وكذلك جوردون (Gurdon) التي ذكرناها من قبل في هذا الباب، على أن الأنوية قد لا تفقد جهدها التام في إحداث النمو. ولكن ماذا عن خلية متباينة - نواة منغمسة داخل سيتوبلازم متخصص؟ وكما يشاهد من الشكل (١٨-٨) فان خلية متباينة واحدة من النبات يمكن إجبارها على الرجوع عن التباين، وبذلك تدخل سلالتها في ممرات جديدة من التباين بالغة الذورة في نبات كامل.

والموقف في الحيوانات ليس بهذه الكيفية من الوضوح. فالحيوان المجروح سرعان ماينتج كتلة من الخلايا المتباينة على جانب الجرح، وبالتدريج تدخل هذه الخلايا الممرات المختلفة من التباين لشفاء الجرح - أي إنتاج تراكيب متباينة جديدة (مثل البشرة، الشعيرات الدموية) والتي تتلاءم مع التراكيب المتباينة من قبل عند حواف الجرح. والدليل قوي على أن الخلايا التي انعكس (أي انتكس) تباينها والتي بدأت في عملية الشفاء (الأبراء) ماهي إلا سلالات خلايا كانت بالفعل كاملة التباين ولكنها أصبحت الآن منعكسة التباين. ولكن الغير واضح هو إلى أي مدى يمكن للخلايا المنعكسة التباين هذه الدخول في أي ممر من ممرات التباين خلاف الممر الذي أمكنها أو أمكن لسلالتها أن تعكسة. وفي كلمات أخرى، فان خلية عضلية ملساء (في عضل غير إرادي) عكست تباينها قد تكون محصورة فقط كي تدخل ثانية في ممر التباين المؤدي إلى خلية عضلية ملساء أخرى.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

البويضات (Oocytes) في جسم امرأة صغيرة السن هي أحد الأمثلة من مائة نوع مختلف من الخلايا والتي تتكـون منها بعض الخلايا الأخرى (مثل خلايا العضلات وخلايا الدم الحمراء) تم وصفها بأختصار في الباب الخامس. وواضح أن كل نوع من الخلايا يختلف في تركيبه عن غيرة. فخلايا الدم الحمراء عبارة عن أسطوانات صغيرة تحتوي على نواه، وخلايا العضل الأملس (الغير إرادي) مغزلية الشكل، وهكذا، كل نوع من الخلايا له وظيفته الخاصة التي يقوم بها. فخلايا الدم الحمراء تنقل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون، وخلايا العضل الأملس تنقبض، وبفعلها هذا تقلل من قطر الأعضـاء المجـوفة كالمثانة والأوعية الدموية. وأخيرا، فان كثيرا من هذه الأنواع من الخلايا تمتاز بأحتوائها على نوع معين من البروتين أو البروتينات. فخلية الدم الحمراء مملـوءة بالهيمـوجلـوبيـن، وخليـة العضـل الاملـس تحتـوي علـى بروتينين قابليـن للأنقبـاض همـا الأكتين (Actin) والميوسين (Myosin)

فمن أين أتت هذه الخلايا؟ الجواب النهائي هو نفس الشيء بالنسبة لهم جميعا، فهي (أي الخلايا) سلالات من بيضة مخصبة والتي كلنا نبدأ بها. فنشوء بيضة مخصبة إلى طفل يتطلب نحـو ٤١ دورة من الأنقسـام الغيـر مباشر ($٢^{٤١}$ = ٢,٢ × $١٠^{١٢}$)، ولكنهـا تحتـاج إلى أكثر من ذلك. فالخلايا البنوية (Daughter cells) الناتجة عن هذه الأنقسـامـات الغيـر مباشـرة لابد من أن تبـدأ الدخـول في ممـرات منفصلـة من النشـوء : فبعضها يصبح خلايا دم حمراء، والبعض سيصبح بويضات (Oocytes) والبعض الأخر سيصبح خلايا عضلية ملسـاء، الـخ. وهـذه هي عملية التباين أو التميز (Differentiation) التي ينتج عنها تكوين سلالات غير متشابهة من الخلايا من خلايا متشابهة رائدة.

ولقد تأكدنا أن جميع الخلايا المتباينة في الجسم تحتفظ بكامل المجموع الجيني (جينوم) للنوع. ولهذا يجب أن نستخلص أنه أثناء عملية التباين، فان كل خلية تصبح ملتزمة بالتعبير عن جزء من الجينوم الموجود في نواتها. فكيف نفسر النشاط التبايني للجينات الذي يظهر كلما تحولت الخلايا إلى ممرات منفصلة للتباين؟

فالمشكلة إذن هي إنشاء طريق يمكن خليتين ناشئتين عن الأنقسام الغير مباشر أن يكـونا نماذج مختلفة من النشاط الجينى بينما يقتسمان معلومات جينية متماثلة . والحل المناسب لهذه المشكلة هو وجود بيئات سيتوبلازمية مختلفة حول الأنوية المتماثلة . ولقد فحصنا الدليل المحير وهو أن قدرة النواه لإبداء معلوماتها الجينية يتحكم فيها السيتوبلازم الخاص الذي توجد فيه تلك النواه. وأثناء أطوار الأنشقاق الأولى، تجد الأنوية المتماثلة النــاتجـة عن الأنقسـام الغـير مبـاشر نفسهـا منفصلة بحـواجـز (جـدر الخـلايا) في سيتوبلازمات مختلفة . وفي أغلب الأحوال، تتكون هذه السيتوبلازمات المختلفة نتيجة التوزيع الغير متجانس للمواد السيتوبلازمية في البويضة المنشقة . وبمجرد ثبات هذه الأختلافات، تصبح مشكلتنا من المسائل التي يمكن حل تفاصيلها الناجمة ببساطة . وبمخلوط واحـد من النواه والسيتوبلازم يمكن التعبير عن جينات معينة، بينما يعبر مخلوط أخر عن جينات أخرى، والمجال يكون معدا الآن لخطوات معقدة تالية .

وربـما يكـون أحـد عواقب تعبير التباين الجينـي أثنـاء النشـوء هو في إرسـال أو استـلام إشـارات كيميائية (مثل المواد المرغبة والمسماه شالونات Chalones) بين نوع من الخلايا ونوع أخر. ومثل تلك الإشارات قد توجه بعد ذلك الخلايا التي تستجيب لها حتى تذهب لمنـطقـة معينة من الجينات لأستخدامها في شكلها ووظيفتها المتباينة في النهاية. وبينما توجد تفاصيل أخرى تتطلب البحث (على سبيل المثال، جهلنا الكبير بالطبيعة الكيميائية للإشارات المرغبة) فاننا على الأقل نستطيع الان أن نرى نظريا كيف يمكن لخلية واحدة، وهي البويضة المخصبة، أن تعطى بالتالي أشد الالات تعقيدا، ألا وهو الجسم البالغ .

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ مم ينشأ العصب البصري في طبقة الجنين الجرثومية؟

٢ ــ ميزبين التوائم المتماثلة والتوائم الأخوية؟

٣ ــ فرخ الضفـدعـة المستعد للفقس يكون أكبر حجما من البويضة المخصبة، ما الذي يترتب على ذلك؟

٤ ــ تلد إناث الأرماديللو دائما أربعة صغار من نفس الجنس، ما تفسير ذلك؟

REFERENCES

المراجع :

1- WOLPERT, L., The Development of pattern and Form in Animals, Oxford Biology Readers, No. 51, Oxford University Press, Oxford, 1974.

2- STEWARD, F.C., "The Control of Growth in Plant Cells." Scientific American, Offprint No. 167, October, 1963.

3- SPEMAN, H., "The Development of Lateral and Dorso-ventral Embryo Halves with Delayed Nuclear Supply," Great Experminents in Biology, ed. by M. L. Gabriel and S. Fogel, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1955. A description of two of the author's famous experiments with constricted newt eggs.

4- GURDON, J. B., "Transplanted Nuclei and Cell Differentiation," Scientific American, Offprint No. 1128, December, 1968.

5- KIRSCHNER, M. W., and J. C. GERHART, "Spatial and Temporal Changes in the Amphibian Egg," Biol. SCIENCE, 31; 381, Mya, 1981. Describes how the point at which the sperm enters the egg establishes the axis bilateral symmetry of the developing embryo.

6- GURDON, J. B., Gene Expression During Cell Differentiation, Oxford Biology Readers, No. 25, Oxford University Press, Oxford, 1973.

7- MARKERT, C. L., and H. URSPRUNG, Development Genetics, Foundations of Deevelopmental Biology Series, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1971. Chapter 6 deals with the ploytene chromosmes.

8- BEERMANN, W., and U. CLEVER, "Chromosomes Puffs," Scientific American Offprint No. 180, April, 1964.

9- EBERT, J. D., and I. M. SUSSEX, Interacting Systems in Development, Holt, Rinehart and Winston, New Yor, 1970. An excellent treatment of the subject, available in paperback.

CHAPTER 19 الباب التاسع عشر

LATER DEVELOPMENT النشأة المتقدمة



الباب التاسع عشر
النشأة المتقدمة

١٩-١ . النمو: GROWTH

لا يتوقف نمو النبات والحيوان على عمليتي التشكل والتباين، إذ يحتاج النمو كذلك الى الزيادة في حجم الكائن، أي نموه. وفي الحيوانات، يحدث أغلب النمو بعد إستكمال عمليتي التشكل والتباين، ولابد من تكملة هاتين العمليتين في جنين الأنسان بوصول الجنين الى وزن ١,٥ جرام، وقد يزداد هذا الوزن، على أية حال، إلى ٤٥,٠٠٠ مرة من الوزن السابق المذكور قبل بلوغ الأنسان حجمه البالغ. ولربما تتذكر كذلك أن فرخ الضفدعة حديث الفقس يكبر بقليل حجم بيضة الضفدعة الأصلية.

و يحدث في النباتات تداخل كبير في هاتين العمليتين الحيويتين، إذ يسبق النمو الطرفي (في منطقة الإستطالة في الجذور والسيقان) التكل والتباين. وعلى أية حال، يحدث نمو السمك في الساق عن طريق كبر حجم الخلايا بعد إنتهاء التشكل والتباين.

وكي يحدث النمو، فان معدل تخليق الجزيئات المعقدة للعضو، البروتينات، على سبيل المثال، لابد من أن يزيد عن معدل تكسرها، وهذا يعني الزيادة في تزويد الكائن بالجزيئات (مثل الأحماض الأمينية، والأحماض الدهنية، والجليسيرول، والجلوكوز) والتي لا بد من أن يحصل عليها الكائن من بيئته. وبعض هذه المواد تمد الكائن بالبنية الأساسية اللازمة لبنائه، والبعض الأخر تمده بالطاقة الزائدة التي يحتاج إليها كي يتم بناء بنيته الأساسية. ففي الكائنات التي تحتاج الى البناء الضوئي، يزود الضوء الكائن بالطاقة اللازمة لبنائه، والجزيئات الغير عضوية هي المواد الأولية.

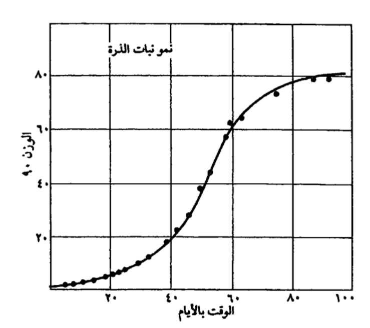
لذلـك يحتـاج موادا من البيئة أكثر مما يعطيه هو للبيئة في شكل متخلفات نواتجه الهضمية، وليست هذه عملية تراكم بسيطة. فالأحماض الأمينية التي تمثلها في جسمك بعد وجبة من لحم البقر لا تتجمع ثانية في خلايا جسمك في شكل بروتين بقرى، ولكن بدلا من ذلك فأنك تنمو بسبب تحويلك جزيئات عضوية غير متخصصة نسبيا أخذت من بيئتك ودخلت على هيئة مواد متخصصة لخلاياك والمميزة لشخصك أنت.

والكائنات ذاتية التغذية أكثر غرابة في هذا الشأن، فلكى تنمو، فهي تحول المواد الغـير عضـوية التي أخـذتهـا من بيئتها (مثـل المـاء، وثـاني أكسـيد الكـربـون والنيتـراتـات) إلـى تراكيب خاصة والتـي ستكون شجرة الأسفنداان (Maple) أو نبات ذرة، أو غير ذلك. وهذه القدرة لكل الكائنات الحية لبناء أعضائها الخاصة والمعقدة من مواد بسيطة نسبيا وغير منظمة موجودة في بيئتها هي القدرة على النمو، وهي أحد أهم الصفات المميزة للحياة.

وقـد يحـدث النمـو ببساطـة فـي الكائنـات بـزيـادة عـدد الخلايـا التـي تصنـع تلـك الكـائنـات. ويتكـون جسـم الأنسـان البالغ من ٦٠ تريليون (٦ × ١٠^١٣) خلية، وقد يحدث النمو كذلك بسبب كبر حجم الخلايا التي تصنع الكائن، فالنباتات ذوات الفلقة الواحدة، الخالـية من الكامبيوم، تنمو في السمك بنفس الطريقة. وعلى العمـوم، فأن الكـائنـات تنمو بطريقتين، الزيادة في عدد الخلايا والزيادة في حجم الخلايا. فالنمو في النباتات الخشبية ذوات الفلقتين يكون نتيجة للطريقتين السابقتين معا، إذ ينتج الكامبيوم والخلايا المرستيمية الطرفية خلايا جديدة، ثم بعد ذلك تكبر تلك الخلايا في الحجم وتتباين.

ويمكـن تمييـز عدة فترات (Periods) في نمو الكائن (الشكل ١٩-١)، وأول تلك الفترات، والمسماه بفترة التأخر (الإعاقة) (lag period) و تتميز بنمو قليل أو حتى بعدم النمو بالمرة. وأثناء تلك الفترة، على أية حال، يستعد الكائن للنمو. فالبذرة تمتص الماء، استعـداد للأنبات، وخلية بكتيريا القولون *E. coli* تخلق الأنزيمات والتي تستطيع بها أن تهضم المواد الغذائية التي تحصل عليها، وكلا المثالان يعتبران ضمن فترة التأخر.

ويتبـع فتـرة التـأخـر فتـرة النمو اللوغاريتمي (Logarithmic or exponential period)، ويبدأ النمو في تلك الفترة ببطء في أول الأمر، ولكن بعد ذلك يحدث النمو



الشكـــل ١٩-١ . تنقيط نمـو نبـات الذرة ينتـج قوسـا على شكـل حرف S (أو سيجما) .

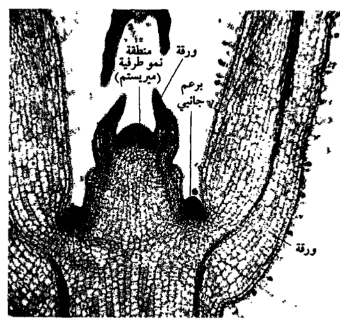
بسرعة أكبر فأكبر. ويمكن تفهم معدل السرعة التدريجي هذا في النمو إذا ماتذكرنا أنه في معظم الحالات، أن نواتج النمو، وهي مواد حية، تكون قادرة في حد ذاتها على المزيد من النمو. وعلى ذلك فان الكائن يكبر طبقا لمتوالية هندسية (Geometric prog-ression) أي يتضاعف ثم يتضاعف ثانية في الحجم . ويعبر عن هذا التسلسل جبريا بعـلامـات (الأس) (اللوغـاريتمات)، لذلك سميت هذه بفترة النمو اللوغاريتمي . وتختلف الكـائنـات المختلفة كثيرا في الوقت الذي تستغرقه لمضاعفة حجمها. فيرقة الذبابة المنزلية حديثة الفقس تضاعف وزنها في مدة ١٣ ساعة، ويحتاج الطفل حديث الولادة إلى ٥-٦ أشهر ليضاعف من وزنه . ومهما كان الوقت الذي تستغرقه هذه الفترة، فأن جميع الكائنات تمر في فترة تزايد ثابت في الحجم .

ولا تستمر فترة النمو اللوغاريتمي على الدوام، بل إن عدم إستمراريتها هذا أفضل فالذبابة المنزلية التي تضاعف من وزنها كل ١٣ ساعة، تكون مخلوقا رهيبا حقا بعد عدة أيام . ولحسن الحظ، فأن يرقة الذبابة (وكذلك كل الكائنات النامية) تدخل بعد ذلك بسرعـة في فترة الأبطاء (Decelerating period). فالنمو الآن يتقدم ببطء أكثر وأخيرا يتوقف كلية . وفي هذا الوقت تجهز اليرقة نفسها للتطور. وفي كثير من الكائنات، يبطؤ معدل النمو ولكن لا ينقطع كلية . فالكثير من الأسماك والزواحف تستمر في النمو سنة بعد أخرى، ولو أن ذلك يحدث ببطء أقل فأقل، إلى أن تموت أخيرا . ويوجد موقف

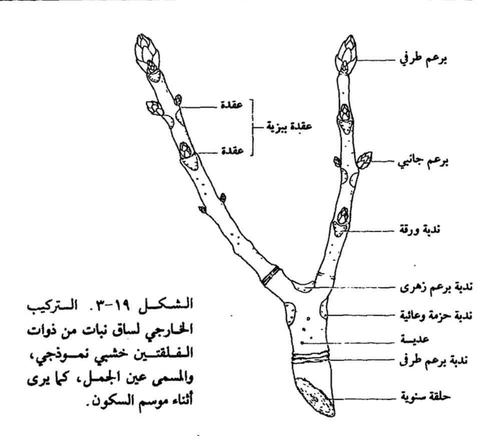
مشابه في الأشجار، التي تستمر في النمو إلا أن ينهي حياتها مرض أو حادث.

والثدييات، بما فيها الأنسان، تبلغ حجما معينا ثم تقف عن النمو كلية وعند هذا الوقت يتوازن تماما معدل تخليق المادة الحية عن طريق التجدد الخلوي في الجسم مع معدل تكسر تلك المواد وبنائها وتغيرها. وفي سنوات تالية، قد يدخل الأنسان فترة من النمو السلبي، أي، ينكمش، ثم تتكسر مكونات جسمه بسرعة أكبر من تخليقها.

وإذا ما قام فرد بعمل رسم بياني ليبين معدل نمو كائن واحد أثناء طورى الأسراع والأبطاء، فأنه ينتج عن هذا الرسم منحنى على شكل حرف (S) (الشكل ١٩-١). ومن الممتع ملاحظة أن هذا المنحنى نفسه يعبر عن نمو تعداد الكائنات. فأذا وضعت بعض البكتيريا أو زوج من الأرانب في بيئة مناسبة وغير مزدحمة، فأنها تنتج سلالات، وهذه السلالات بدورها تنتج سلالاتها، ويستمر ذلك في طريق مستمر إلى أن تضطرها عوامل خارجية على إبطاء معدل نمو هذه التعدادات. وتوجد لدى علماء الأحياء فكرة جيدة عن تلك العوامل الخارجية التي تتدخل في توازن النمو التعدادي وسنقوم في الباب الأربعين بدراسة تلك العوامل. ولكن علماء الأحياء غير متاكدين من العوامل التي تبطيء من نمو الأفراد. إذ ربما تختلف العوامل المتحكمة من مجموعة إلى أخرى من الكائنات. وعلى العموم، وحتى معرفة تلك العوامل، ستبقى فجوة في معلوماتنا عن النمو.



الشكل ١٩-٢. برعم طرفي لساق *Coleus*، مقطوع طوليا. تنتج خلايا جديدة بالانقسام الغير مباشر في الميريستم الطرفي. وبعد ذلك، قد يحدث التفرع عند البراعم الجانبية.



الشكل ١٩-٣. التركيب الخارجي لساق نبات من ذوات الفلقتين خشبي نموذجي، والمسمى عين الجمل، كما يرى أثناء موسم السكون.

ويحدث النمو في النباتات أساسا من المناطق المرستيمية، وهنا يزود الأنقسام الغير مباشر السريع الخلايا الأضافية اللازمة. ويظهر الشكل (٩-٢) المنطقة المرستيمية عند طرف الجذر. ويمد المرستيم الخلايا الجديدة، والتي عندما تطول وتتباين، تمكن الجذر من الزيادة في الطول. ويحدث نظام مماثل للنمو الطولى عند قمة الساق (الشكل ١٩-٢) وينتج عن الأنقسام الغير مباشر في المنطقة المرستيمية (الشكل ١٩-٢) عند طرف الجذر أو البرعم الطرفي مجموعة من الخلايا الجديدة، وتكون هذه الخلايا الأوراق دوريا. وتسمى نقطة خروج الأوراق من على الساق بالعقدة (Node) (الشكل ١٩-٣) والمسافة ما بين العقد في البرعم الطرفي قصيرة جدا، وعندها تنمو الأوراق بسرعة. ونتيجة لذلك، تنمو الأوراق فوق الميرستيم الطرفي (الذي أنتج تلك الأوراق) لحمايته. وتنمو المرستيمات الجديدة، وهي البراعم الجانبية عند العقد وفوق نقطة إتصال ورقة مباشرة. وعند نمو تلك البراعم الجانبية، فأنها تعطى نسيج ساق جديد وبذلك تتكون الأفرع.

وتحت ظروف خاصة (والتي سنتناولها بالدراسة في الباب السادس و العشرين)،

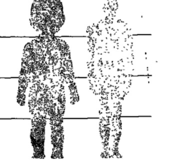
يتحول المرستيم الطرفي إلى برعم زهرى، وهذا ينمو إلى زهرة وبذلك يمكن للنبات أن يستمر في تكاثرة الجنسي. وعملية تكوين البرعم الزهري «يستهلك» المرستيم الطرفي فيقف نمو الساق عند هذه النقطة. ويحدث التفرع (خروج الأفرع)، عموما، من البراعم الجانبية الموجودة أسفل الزهرة مباشرة (الشكل ١٩-٣).

ولا يحدث النمو في الحيوانات في مثل تلك المناطق الموضعية كما في النباتات، إذ أن كل الأنسجة والأعضاء في جسم الحيوان تساهم في عملية النمو. ويوضح (الشكل ١٩-٤) مقدار سرعة نمو جذع وأطراف الأنسان من الطفولة إلى البلوغ والتي تكون أكثر من مقدار سرعة ونمو الرأس، والنتيجة هي تغير واضح في نسب الجسم.

ومن الأساسيات الضرورية لنمو الجسم هو نمو هيكله الدعامي، فالعظام قادرة على النمو والأستطالة ولكن فقط طالما كانت لديها منطقة غير عظمية غضروفية حيث يحدث تكاثر الخلايا والأستطالة. وفي العظام الطويلة، يحدث هذا عند خطوط الأطراف النهائية والموجودة خلف الأطراف النهائية الصلبة لتلك العظام.

وفي الأنسان، تصبح مناطق النمو في العظام متعظمة تماما فيما بين العاشرة والعشرين من العمر، إذ يحل مكان المادة البينية للغضاريف في تلك المناطق مادة بينية (Matrix) عظمية ويقف أي نمو هيكلي. ويحدث إيقاف النمو كذلك في الثدييات الأخرى ولكن في سن أصغر في العادة. ومن جهة أخرى، فأن الكثير من الأسماك والزواحف تستمر في نموها الهيكلي طوال حياتها.

وتدعو مشكلة النمو إلى الأهتمام بتلك الحيوانات التي تقوم بظاهرة التطور، إذ تنشأ غالبية اللافقاريات المائية (مثل السمكة النجمية)، والبارناكلات (Barnacles)، وكثير من الفقاريات المائية (مثل الضفدعة)، وأغلب الحشرات من الزيجوت إلى يرقة (Larva) وبعد ذلك يحدث لليرقة تغيرات كبيرة من التطور ويخرج بعدها الجسم البالغ.



الشكل ١٩-٤. النمو التشكلي في الانسان. رأس الطفل تقريبا ١/٤ طول الجسم، بينما في الانسان البالغ يكون طول الرأس نحو ١/٨ طول الجسم.

وأهمية طريقة النمو ذات الطورين (في الحيوانات ذات التطور) غير واضحة دائما. وللحيوانات أمثال البارناكلات والتي تكون أجسامها مثبتة، يسمح طورها اليرقى الذي يسبح بحرية في أنتشار تلك الحيوانات. وفي حالات مثل اللوبستر والضفدعة، تعمل اليرقة كطور وسطى في النمو والذي عن طريقها (أي اليرقة) يمكن الحصول على الغذاء (غالبا تكون مكونات هذا الغذاء صغيرة الحجم جدا، مثل الطحالب وحيدة الخلايا) من البيئة، وهذا يسمح بمزيد من النمو أكثر مما كان يمكن الحصول عليه من نمو يسببه مخزون الغذاء في البيضة نفسها، وبذلك يمكن للحيوان أن يصل إلى الحجم اللازم الذي يمكنه من تناول الغذاء الخاص بالطور البالغ.

وبينما تكون اليرقة إحدى أطوار النمو في الكثير من الحيوانات، إلا أنه لا يصح التفكير بأنها غير تامة النمو أو بأنها كائن جنيني. وعلى سبيل المثال، فيرقة فراشة الحدائق (من رتبة حرشفية الأجنحة التي تضم الفراشات وأبى دقيق) هي كائن متخصص، وهي كإحدى نواتج التشكل المتقنة وكاملة التباين في الخلايا فيما عدا في وجود كتل من الخلايا الجنينية المسماه Imaginal Discs (أي حلقات الحشرة الكاملة أو البالغة - Imago) بداخل جسمها. وأثناء التطور، تموت أغلب خلايا اليرقة المتخصصة، وتمد تلك الخلايا الميتة بالغذاء الضروري لخلايا الحلقات المذكورة للقيام بنموذج جديد من التشكل والتباين، وتكون نتيجة ذلك تكون أعضاء الحشرة الكاملة (Adult) التي قد تكون فراشة أو أبى دقيق. ويحدث كل النمو في الحشرة أثناء طور اليرقة. وفي الحقيقة، فأن بعض الحشرات الكاملة لا تتغذى مطلقا، فهي تتزاوج ثم تموت.

والسبب الأخر في أعتبار أن اليرقات لا يصح أعتبارها أشكالا غير كاملة النمو هي وجود حالات تشمل أنواعا هجرت ظاهرة التطور كلية. فالحيوان البرمائي المسمى أكسولوتل (Axolotl) والذي يوجد في المكسيك وجنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية، يقضى كل حياته كحيوان يتنفس عن طريق الخياشم (الشكل ٢٧-٦) وهو يصل إلى النضوج الجنسي ويتزاوج بدون أن يقوم بعملية التطور إلى الشكل الذي يتنفس الهواء الجوى. وبينما لا يوجد أي دليل على أن حيوان الأكسولوتل هذا لن يقوم بأي عملية تطور ينتج عنه وجود مجموعة كاملة من الحيوانات، فأنه يوجد الدليل على أنه في الماضي، كانت اليرقات وليست الحيوانات البالغة، هي التي تطورت إلى أنواع

جديدة. وسنقوم بفحص بعض من هذه الأدلة في أبواب لاحقة.

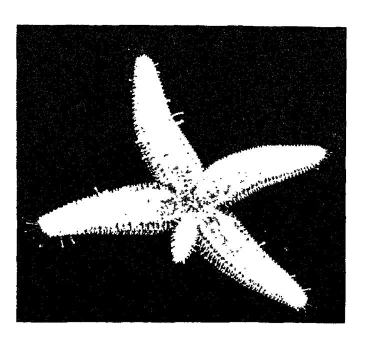
١٩-٢. التجــدد : REGENERATION

أثناء حياة أي كائن، قد تتلف أو تفقد بعض أجزائه. وتملك أغلب الكائنات، لبعض الشيء، القدرة على إحلال تلك الأجزاء المفقودة أو التي أصابها التلف، وتعرف عمليـة الأحـلال هذه بعمليـة التجـدد (Regeneration) (الشكل ١٩-٥).

وللنباتات قدرة فائقة على التجـدد، إذ أنه من الممكن في بعض الأحيان نزع أفرعها أو مجموعها الخضري بالتقليم. فأذا ما كان المجموع الجذرى سليما، فأن البراعم، على أية حال، تظهر سريعا على الساق، فتنمو البراعم الى أفرع جديدة، وأوراق، وأزهار. وفي الحقيقـة، فأن كثيرا من الأخشاب الصلبة (شجر الأسفندان Maple والبتولا Birch و غيرها) يمكن قطعها من عند سطح الأرض، وبالعمل على إنباتها من عند حواف بقية الجزء المقطوع يمكنها إعطاء سيقان وأوراق جديدة.

وتختلف قدرة الحيوانـات على تجديد الأجـزاء الغـائبـة كثـيرا من نوع إلى آخـر. فالاسفنجيات يمكنها تجديد كل الكائنات من كتلة صغيرة من خلاياها، وينطبق نفس الشيء على الهيدرا.. ويمكن لحيوان البلاناريا تجديد نفسه بأكملة من قطعة وسطية منـه، حتى سمكـة النجمـة، تستطيع تجديد نفسها كاملة من ذراع واحد والقرص الوسطى. وفي وقت من الأوقات كان صيادوا الأويستر يستخدمون شبكة (أوجرافة) لصيد سمـك النجمـة من أمـاكن وجـودها، ثم تقطيعها لقتلها، ثم قذف الأجزاء المقطوعة من على سطح المركب الى البحر، وسرعان ما أكتشفوا – مع حزنهم الشديد – على مقدرة تلك الأجزاء المقطوعة على التجديد في هذه المجموعة من الحيوانات.

أما عن ديدان الأرض، والقشريات، والأسماك، والسلاماندر، والسلاحف، فهي لا تملك نفس القدرة على التجـدد أي قدرتهم على تجديد كل الكائن من جزء صغير، ولكنها تملك القدرة على تجديد الأجزاء الأساسية نوعا. فيمكن لدودة الأرض أن تجدد الحلقات الأربع أو الخمس الأولى من جهة الرأس وحتى جزء أطول من طرفها الخلفي. ويمكن للوبستر والسلاماندر تجديد رجل غائبة، ويمكن للكثير من السلاحف الهرب إذا ما قطع ذيلهـا عنـد الإمساك به، وبعدئذ يمكنها تجديد ذيل جديد عندما تريد. أما عن



الـشـكـل ١٩-٥. ذراع السمكـة **نجـم البحـر** (بتصريح من دكتور تشارلز والكوت).

الطيور والثدييات فهي لا تستطيع تجديد أعضاء بأكملها، ولكنها تستطيع، على أية حال، تجديد الأنسجـة وبذلك يمكنها إصلاح الأجزاء التالفة أو المفقودة. واندمال جروح الجلد وكسور العظام مثال واضح على التجـدد في الأنسان. والأحلال المستمر لخلايا الدم الحمراء التالفة والخلايا الطلائية المنزوعة مثال أخر، كما أن الغدد الهضمية، وخاصة الكبد والبنكرياس، قادرة على التجـدد بعد التلف.

ماالـذي يحدث إذن في عملية التجـدد؟ إذا ما نزعت الرجل الأمامية من حيوان السلاماندر، فأول عملية إصلاح هي تجدد الجرح بواسطة نمو الجلد فوقه ثم يظهر برعم من الخلايا المتباينة، ولهذا البرعم نفس مظهر برعم الطرف في الجنين الناشيء. وربـما تنشأ الخلايا الجنينية السريعة الأنقسام والغير متخصصة لبرعم الطرف بسبب تباين خلايا متخصصة مثل خلايا العضلات وخلايا الغضاريف. والتباين يعني أن هذه الخلايا تفقد تركيبها التبايني قبل أن تتولى عملية التجـدد. وبمرور الوقت، تصبح خلايا الـطرف المتجدد منتظمة ومتباينة للمرة الثانية في العضل، والعظمة، وأنسجة أخرى والتي ستكون الرجل العاملة.

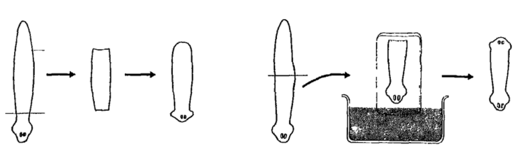
وأظهرت دراسات التجـدد أن الخلايا الناضجة (البالغة) المتباينة لنسيج ما، مثل البشرة، يمكنهـا خلق وإفراز مادة تمنع نشاط الأنقسام الغير مباشر للخلايا الصغيرة

لنفس النسيج . وتسمى تلك المادة شالون Chalone". وفي الأطوار المبكرة لعملية التجدد ، لا توجد خلايا ناضجة (بالغة) وبذلك لا يوجد مانع لأنقسام الخلايا. وبمجرد تباين أنسجة العضو المتجدد، يبدأ إنتاج الشالون، وربما، يبدأ الشالون هذا في إيقاف النمو للعضو المتجدد.

وفي الحقيقة، فأن إنتاج الشالون بواسطة الخلايا المتباينة تبدو وكأنها ظاهرة عامة. وفي الحقيقة فان كل نسيج تم إختباره (منها الكبد، والكلية، والرئة، والحالب، وفوليكل الشعرة، وخلايا الدم البيضاء) ينتج شالون يمنع الأنقسام الغير مباشر في الخلايا الغير ناضجة لهذا النسيج وليس لنسيج أخر، ولا تضر تلك الشالونات بالأنشطة الأخرى لهذه الخلايا بأي حال من الأحوال. ولو أنه لم يمكن حتى الأن معرفة التركيب الكيميائي للشالونات، الا أنها تتصرف وكأنها بروتينات أو عديدات الببتيدات، ولو أن فعل الشالونات متخصص للغاية بالنسبة للنسيج، ولكنه ليس كذلك بالنسبة للنوع. فشالون البشرة من حيوان ثدييى (أو حتى من سمكة) يمكنه منع الأنقسام الغير مباشر في بشرة حيوان ثديي أخر.

تتشابه عملية التجدد مع عملية النشوء الجنيني من عدة نواحي، فمن سرعة الأنقسام، ينشأ نظام معقد من الخلايا الغير متخصصة، ويتضمن هذا التشكل والتباين تماما كما يحدث في النشوء الجنيني. وتوجد، على أية حال، وسيلة واحدة على الأقل والتي فيها تختلف عملية التجدد عن عملية النشوء الجنيني، فهل يمكنك إذن التفكير في سبب ذلك؟

إن التشابه بين التجدد والنشوء الجنيني جعل علماء الأحياء يقومون بدراسة ظاهرة التجدد علهم يتفهموا كيفية عمل النشوء الجنيني. وأظهر إكتشاف الأستقطاب وجود قوي منظمة محددة، ربما تكون كيميائية، تقوم بعملها في عمية التجدد. فقطاع وسطى في حيوان البلاناريا سيجدد رأسا جديدة عند حافة نفس القطاع والتي كانت عندها رأس أصلا، كما سيتجدد ذيل عند الطرف الأخر. ولقد وجد أن الخلايا الموجودة عند سطح القطع المتقدم ذات معدل تمثيل حيوي أعلى من تلك الموجودة عند الطرف الخلفى، ويبدو أن هذا الأختلاف في معدلات التمثيل الحيوي في خلايا القطعة المتجددة هو الذي يحدد الأستقطاب. وإذا، أبعد القطاع الخلفى لدودة ثم عوملت الرأس بعد ذلك بمحلول يحتوي على مانع للتمثيل الحيوي، فإن إستقطاب الدودة



الشكل ١٩-٦ . التجـدد في حيوان البلاناريا . الى اليسار : كل سطح مقطوع من البلاناريا «يتذكر استقطابه» . الى اليمين : اذا وضعت رأس بلاناريا مقطوع في آجار ثم تغمس في ماء يحتوي على مانع للتمثيل الحيوي تنشأ رأس ثانية على سطحة المقطوع .

يمكن إرجاعة (عكسة) وعندئذ تتكون رأس ثانية عند الطرف الخلفى (الشكل ١٩-٦) .

وبمقارنة القدرة التجديدية للحيوانات المختلفة ، يبدو وكأنه توجد علاقة بين تعقيد الكائن وبين قدرته على التجـدد . فالقوي في التجـدد في الأسفنجيات كاملة تقريباً . وفي الأنسـان ، يكون التجـدد محددا في إصلاح بعض الأعضاء والأنسجة . وياليتنا نعرف لماذا تنعدم القوي التجديدية بزيادة التعقيدات في التركيب والفسيولوجيا .

وبداخل كل كائن ، على الأقل بين الفقاريات ، يبدو وكأنه يوجد فقد متزايد على القدرة التجديدية بزيادة العمر . فعند ظهور أرجل في مبدأ الأمر على فراخ الضفدعة ، يمكن تجديدهـا بسهولة إذا ما فقدت . وبعد التطور ، تكون الضفدعة غير قادرة في العادة على تجديد الرجل المفقودة . ويعلم كل إنسان جيدا لماذا تشفى العظام المكسورة والجروح الجلدية في الطفل أسرع مما في الأنسان الأكبر سنا . وما هو المسبب إذن في فقد قوة التجـدد كلما زاد السن؟ في الضفدعة ، ربما لا يستطيع مكان البتر تلقى الكميات الكـافية لبعض المـواد التي تفـرزها الأعصاب . فأذا ما أمكن إيصال أعصاب زائدة جراحيا الى مكـان الجزء المقطوع من رجل الضفدعة الأمامية يحدث التجـدد . ومن المعروف أن نسبة النسيج العصبي بالنسبة الى الأنسجة الأخرى تقل كلما نمت فراخ الضفدعة الى ضفدعة بالغة . فمن الممكن ، اذن ، قطع الرجل . وهذا بدوره يؤدي الى اقـتراح شرح بديل ، فربما يفقد النسيج المسن القدرة على الأستجابة للمواد المروجة (المشجعة) للتجديد والتي تفرزها الأعصاب . فأذا كانت هذه هي الحالة فيمكن لتهييج هذا النسيج أن يعيد إليه بعضا من حساسيته .

السـرطـان : CANCER

١٩-٣. حيوية (بيولوجية) السرطان: THE BIOLOGY OF CANCER

يقتل السرطان نحو ٤٠٠,٠٠٠ شخصا سنويا في الولايات المتحدة الأمريكية. ولربما تكون حياتك شخصيا متأثرة بالفعل بأصابة أحد الأشخاص القريبين منك بالسرطان، وبالتأكيد سيحدث هذا في السنوات القادمة. ما هو السرطان إذن ولماذا أصبح مرضا منتشرا ومخيفا؟

والسرطان هو أي تكاثر للخلايا لا نستطيع التحكم فيه. في بعض الخلايا يكون تكاثر الخلايا مرتفع جدا، ولكن ليس هذا هو الحال دائما. وماذا يميز السرطان عن طرق الأنقسام العادي للخلايا، مثل تجدد الأنسجة المفقودة أو تكون نموات حميدة كالشامة مثلا، فهل إذن لا تتوقف خلايا السرطان عن الأنقسام، وهذه هي الصفة التي تؤدي في الغالب الى موت الضحية.

و يمثل السرطان الفشل العادي للتشكل وللتباين. وعادة، فأن الخلية المنقسمة في النسيج «تعرف» سرعة أنقسامها ومتى تقف عن الأنقسام. وعلى سبيل المثال، فالخلايا الأساسية في نخاع العظام عادة ما تنتج خلايا دم كافية لاحلال ماتم تدميره أو موته. ومعدل الأنقسام الغير مباشر في الكبد العادية بطيء نسبيا، لكن إذا ما أبعدت قطعة من الكبد عن طريق الجراحة، فأن باقي الخلايا تبدأ طورا من التوالد السريع، ويستمر هذا التوالد الى أن – وفقط الى أن – يتم تجدد الكبد. ويمكننا الأن أن نخمن فقط عن كيفية معرفة النسيج بأتمام عملية تجديده، ولكن تبقى الحقيقة في أنه يعرف.

و التـوالـد (Proliferation) ، والتشكـل، والتباين في الخلايا العادية تحتاج أن تكـون تلك الخلايا في موقع مناسب داخل الجسم. فأذا ما وصلت الخلايا الطلائية المنقسمة إلى نخاع العظام فأنها تتوقف عن الأنقسام وتموت. وإذا ما حقنت الخلايا الأساسية لنخاع العظام في حيوان تجارب (أو في أنسان) فأنها تملأ جميع الجسم، ولكن فقط تلك الخلايا الأساسية لنخاع العظام التي تأوى إلى النخاع يمكنها أن تبدأ في الأنقسام والتباين إلى خلايا دموية. ومن المعتقد أن هذا يحتاج الى البيئة الصحيحة التي تعكس الأشـارات المـرغبـة الكيميائية. ولا تحتـاج خلايا السرطـان إلى مثـل هذه الاحتياجات، فالسرطانات، كما سنري، تبدأ دائما في بقعة واحدة، وهذا هو الورم

الأولى. ولكن بعد فترة من النمو الذي لا يمكن التحكم فيه (أنظر الشكل ٢١-٢٨)، تنزع الخلايا من الورم الأولى وتذهب إلى الليمف والدم للأنتشار في أماكن أخرى من الجسم. وبينما لا تصلح كل تلك الأماكن الجديدة لخلايا السرطان، ولكن توجد أماكن أخرى تصلح لذلك وفيها تنمو الخلايا الى أورام جديدة، وتعرف تلك الظاهرة باسم التورم أو ميتاستاسز Metastasis". وعلى سبيل المثال، فان بعض هذه الأورام والتي تنشأ في الجلد وكذلك معظم الأورام التي تنشأ في الرئات غالبا ما تنتقل ظاهرة التورم بها إلى المخ، ولـو أنه الأن حتى في الأماكن الغير مباشرة تستمر ظاهرة الميتاستاسز هذه في الأنقسام لإظهار خواصها الأصلية، وهذه الميتاستاسز هي التي تودي بحياة المريض.

و تمثـل السرطـانـات كذلـك فشل التباين العادي، إذ لا تأخذ خلايا السرطان التراكيب والوظائف التي يتميز بها النسيج الذي نشأت منه هذه الخلايا السرطانية. ويمكن ملاحظة طبيعة عدم التباين في معظم الخلايا السرطانية في تركيبها الغير طبيعي وفي فقدانها المستمر لوظيفتها التباينية. وبعض السرطانات، على أية حال، تستمر في تصنيع منتجات تتميز بها الخلايا المتباينة للنسيج الذي نشأت منه تلك الخلايا السرطانية وعـلى ذلك فان السرطانات الناشئة في أحد الأنسجة الصماء عادة ماتستمر في إفراز هرمـونـاتها، كذلك فان الخلايا المكونة للأجسام المضادة والتي تصاب بالسرطان قد تستمر في تصنيع أجسامها المضادة.

ولربما كانت الخلايا السرطانية هي خلايا إرتدت عن التباين، أي أنها إرتدت من حالة التباين اى الحالة الجنينية الغير متباينة (مثل الخلايا المستخدمة في تجديد الجروح - أنظر رقم ١٩-٢). وأحد أسباب أعتبار الخلايا السرطانية أنها خلايا فقدت تباينها أنها تحتوي على البروتينات المميزة للأنسجة الجنينية. وألفا فيتوبروتين (AFP) وكذلك (CEA) Carcinoembr yonic antigen هما من تلك البروتينات المذكورة، وكلاهما يتم إنتاجه بكميات بواسطة بعض أنواع السرطانات.

وتوجد، على اية حال، طريقة اخرى لرؤية التركيب والوظيفة الغير متباينتين لخلايا السرطان. ويحدث تحول الخلية العادية إلى خلية سرطانية في أغلب سرطانات خلايا الدم (مثل الليكيميا Leukemia) والخـلايا الطلائية مثل السرطان المعروف باسم (Carcinoma) والأنسجة المتجددة من جميع الأنواع لهى أكثر أنتشارا بشكل كبير عن سرطانات الخلايا التي لاتنقسم أمثال الخلايا العضلية والخلايا العصبية. ولكن الخلايا المنقسمة تعتبر

بطبيعتها غير متباينة أو متباينة جزئيا. وعلى هذا فلربما كانت الخلايا السرطانية في الحقيقة خلايا لم تفقد وظيفتها المتباينة بل هي ببساطة خلايا تشبه الخلايا الأساسية (خلايا الأصل) (Stem-like) ولكنها أصبحت مكبوتة أوفقدت ظاهرة النمو. والبروتينات الجنينية مثل (AFP) ، (CEA) ربما لا تعكس كونها أنسجة جنينية بهذا الشكل، بل ببساطة تعكس خواص الخلايا الغير متباينة، حتى إذا ما حدث هذا في الطور البالغ بأعداد صغيرة أو كما في الجنين بأعداد كبيرة. وفي الحقيقة، توجد كميات صغيرة من (AFP) ، (CEA) في البالغين العاديين.

السرطانات هي مجاميع متماثلة CANCERS ARE CLONES

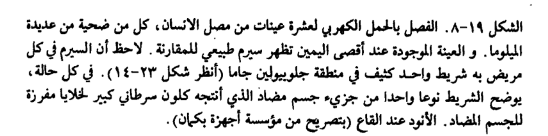
يبدأ كل سرطان بخلية واحدة، مهما كان سبب تحول الخلية العادية إلى خلية سرطانية، فأن الخلية السرطانية لا تهاجم كتل الخلايا بنفس الطريقة، على سبيل المثال، الذي تهاجم به العدوى بأى مرض لهذه الكتل من الخلايا، ولو أنه في الأطوار النهائية للسرطان، قد يمتلىء الجسم ببلايين الخلايا السرطانية، وكلها سلالة خلية واحدة بادئة. ولهذا فكل خلايا أي سرطان، في الميتاستاسز (Metastases) وكذلك في الورم الأولى، تتكون من مجموعة متماثلة (Clone).

ولنختبر الأن دليلين يؤيدان بقوة طبيعة الكلون في السرطان. ويمكنك إسترجاع ذلك في أنثى اليديبات، حيث يوجد × كروموسوم واحد غير نشط في كل خلية. وأي

الشكل ١٩-٧. السرطانات هي مجاميع من الخلايا المتماثلة (Clones) (أ) بسبب عدم نشاط - X ، أنسجة أنثى الثدييات هي موزايك لخواص يتحكم فيها الكروموسوم X (أنظر قسم ٣-١١). يتكون النسيج الطبيعي من مجاميع صغيرة من الخلايا الناشئة عن خلية واحدة معبرة عن واحد أو آخر من كروموسومات X. (ب) السرطانات ليست موزايكية، كل خلايا الورم السرطاني في أنثى الثدييات تعبر عن نفس الكروموسوم X. وهذا يقترح أن كل خلايا السرطان ناشئة عن خلية واحدة، أي صانعة كلون. وانواع أخرى من الأدلة (كما في شكل ١٩-٨) تدل على أن السرطانات في الذكور هي كلونات أيضا.

× كروموسوم غير نشط في خلية من الخلايا (سواء أكان أنثى أو ذكر) لهو من قبيل الصدفة كلية. ويبدأ عدم نشاط (خمول) كروموسوم (×) مبكرا فى النشوء الجنيني وغير قابل للأرتداد. فإذا كانت الانثى متباينة اللاقحة (Heterozygous) لجين موجود على الكروموسوم (×) فأن أنسجة جسمها ستصبح كالفسيفساء (Mosaic) بالنسبة إلى أداء هذا الجين، أي يمكن القول، بأنه في أي نسيج من جسمها، توجد كتل صغيرة من الخلايا صغيرة عن أن أحد أزواج الجينات المتضادة (Alleles) سيندمج مع كتل صغيرة من الخلايا المعبرة عن الأخرى (الشكل ١٩ـ٧). وعلى أية حال، عندما يصيب السرطان هذه الأنثى، فأن كل خلية في السرطان مهما كان كبر الورم أو كم عدد الميتاستيزس التي كونها ـ تعبر عن نفس الجين المتضاد. ويمكن تفسير هذا السلوك بانشقاق كل خلية من سرطان هذه الأنثى من خلية واحدة أساسية والتي تكونت في مبدأ الأمر.

والميلوما المتعددة (Multiple Myeloma) نوع من السرطان الذي يصيب الخلايا المفرزة للأجسام المضادة والمسماه بخلايا البلازما. وكل منا قادر على صنع نحو مليون نوع مختلف من جزيئات الأجسام المضادة، وفي أي وقت من الأوقات نقوم بتصنيع عدة مئات من الأنواع المختلفة. ولكن كل خلايا البلازما والمصابة بالسرطان الميلومي المتعدد تصنع نفس النوع من جزيئات الجسم المضاد (الشكل ١٩–٨). ومرة ثانية فإن توضيح ذلك هو أن كل خلايا بلازما الدم المريضة بالسرطان هي من سلالة خلية واحدة، أي، أنها تكون مجموعة متماثلة (Clone).



الشكل ١٩–٨. الفصل بالحمل الكهربي لعشرة عينات من مصل الانسان، كل من ضحية من عديدة الميلوما. و العينة الموجودة عند أقصى اليمين تظهر سيرم طبيعي للمقارنة. لاحظ أن السيرم في كل مريض به شريط واحد كثيف في منطقة جلوبيولين جاما (أنظر شكل ٢٣–١٤). في كل حالة، يوضح الشريط نوعا واحدا من جزيء جسم مضاد الذي أنتجه كلون سرطاني كبير لخلايا مفرزة للجسم المضاد. الأنود عند القاع (بتصريح من مؤسسة أجهزة بكمان).

ولو أن الأورام الصلبة تكون غير طبيعية في تشكلها وتباينها، **فإنها تعتمد على الدعم الأيضي** الذي تزودة بها الأنسجة العادية. وعلى وجه الخصوص، تفرز الأورام الصلبة مادة تسبب إمدادها بالدم العادي للنمو داخل الورم. وبهذه الطريقة فإن إحتياجات الورم من الأيض - الغذاء وتبادل الغازات والإفراز - يكون مضمونا. وباستمرارية نمو الورم، تنتزع منه خلايا الدم والليمف، وتكرر الميتاستيزس التي تتكون في أجزاء أخرى من الجسم طريقة جذب إمدادها بالدم.

١٩-٤ . ما الذي يسبب السرطان: WHAT CAUSES CANCER ?

وكما هي دائما الحالة مع مثل تلك الأسئلة، توجد عدة مستويات للأسباب التي يمكننا إعتبارها، وهنا سنتناول السبب على مستويين: (١) التغير الذي يحول خلية عادية إلى خلية سرطانية، (٢) الدوافع أو العوامل التي تشحذ هذا التغير.

وبالنسبة للمستوي الأول، وبالرغم من البحث المتواصل لعدة سنوات، فلا توجد حتى الآن إجابة محددة، وربما لن تكون هناك أبدا إجابة واحدة. ولكن ماهو واضح، على أية حال، هو أن تحول خلية عادية إلى خلية سرطانية يتطلب أحداثا موجودة على مستوي الجينات. وبينما أن طبيعة تلك الأحداث بالضبط غير معروفة، فإن معلوماتنا عن العوامل التي تسبب هذه التغيرات الجنينية أصبحت محددة الآن تماما. ولنختبر الآن هذين المستوين من الأسباب:

١ ـ السرطان يتضمن تغير وراثي :
CANCER INVOLVES A GENETIC CHANGE

تكون الخصائص السرطانية للخلية ميزة ثانية وقابلة للتوارث لهذه الخلية، ولاتعطي الخلايا السرطانية مطلقا خلايا عادية، كما لا يمكن للخلايا السرطانية بقدر ما يمكننا تقديرة، أن تصيب خلايا عادية بخواصها السرطانية. ومايحول خلية عادية إلى خلية سرطانية يستمر في الأجيال المتلاحقة مع كل إنقسام غير مباشر مثل أي صفة تتحكم فيها العوامل الوراثية.

وهناك أقتراح بوجود علاقة قوية بين الجينات والسرطان وذلك لوجود نماذج واضحة على وراثة القابلية لنشوء بعض أنواع السرطان داخل الأسرة الواحدة. ومثال واضح

على ذلـك هو السرطـان المسمى سرطـان الجلـد (Xeroderma pigmentosum) فضحايا هذا المرض الموروث والذي من أعراضه نقص الآلة الأنزيمية العادية لأصلاح (DNA) التالف، إذ أن التعرض للأشعة فوق البنفسجية تتلف الـ (DNA) كما رأينا من قبـل (أنـظر قسم ١٢-٥)، وهـذا يوضح لماذا يصاب ضحايا الأكسيرودرما المحببة بسرطان الجلد، وخاصة على أجزاء الجسم المعرضة لأشعة الشمس.

وتـوجد مجموعة كبيرة من المواد الكيميائية ثبت أنها تسبب السرطان. وفي أغلب الأحوال، فأن طبيعة إحداثها للضرر غير محددة تماما. وعلى أية حال، فأنه في الحالات التي تم أختبارها، أظهرت هذه المواد أنها تعمل مباشرة مع (DNA). ويمكن توضيح العلاقة الوثيقة بين الأصابة السرطانية وبين التأثير على الجينات أيضا بحقيقة أن ٩٠٪ من جميع المواد الكيميائية التي تسبب السرطان تسبب أيضا طفرات كما أظهره اختبار العالم إيمز (Ames) (أنظر قسم ١٢-٥).

وتسبب بعض الفـيروسات السرطان في حيوانات التجارب (وربما في الأنسان). والخواص المسببة للسرطان في تلك الفيروسات تبدو وكأنها موجودة في جين واحد أو أكثر والتي هي جزء من جينـوم الفيروس. ولإحداث سرطان في خلايا العائل، لابد من انتقـال تلك الجينـات إلى جينوم خلية العائل. ومن العجيب بالفعل أن الدراسات التهجينية للـ (DNA) (أنظر قسم ١٤-٣) أثبتت أنه ربما لا توجد بالفعل جينات متماثلة في الخلية العادية للعائل قبل الأصابة بالسرطان. ويوجد تفسير واحد لهذا الأكتشاف العجيب وهـو أن الجينـات المسببة للسرطان ربما، في الحقيقة، هي الجينات العادية للعائل أو قريبة الشبه جدا للعادية (ولربما تكون الجينات التي تقوم بوظائفها في العادة أثناء الأطوار الأولى للأنشقاق الجنيني والتشكل). ومهما كان دورها الطبيعي، إذا ما ظهر أن التكوين الجنيني يحتاج إلى جعل الصفة السرطانية تسكن بالفعل داخل الخلية إذن فالـترغيب للسرطـان بالفـيروسـات ربما تكون مسألة تنظيم : تشغيل الجين أو الجينات في أوقات غير مناسبة، أو عند مستويات عالية غير عادية من النشاط.

وتأكيدنا على الأساس الجيني للسرطان لا يصح أن يقودنا إلى الوصول إلى خلاصة أن نقطة بسيطة من الطفرات هي واحد أو قليل من الجينات المتضادة اللازم تواجدها في هذا المجال. وقبل كل شيء، يثبت تحليل الخريطة الكروموسومية (Karyotype) على خلايا السرطان على أنه عادة ما يظهر واحد أو أكثر من الشذوذ الكروموسومي الكبير

(أنظر قسم ١١-٤). فالخلايا السرطانية تكون عادة ذات أعداد غير عادية من الكروموسومات، أو كروموسومات غير عادية التركيب، أو كليهما.

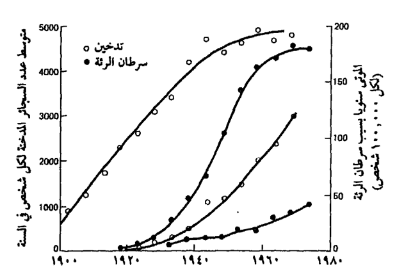
وقد يحتاج خلق خلية سرطانية إلى خطوتين منفصلتين، فبعض المواد الكيميائية التي تسبب السرطان قد تكون فعالة عند الجرعات المنخفضة إلا اذا كانت الخلايا المعرضة لها معرضة أيضا لمادة ثانية تسمى مروج "Promoter". ويبدو أنه عند الجرعات المنخفضة لا تسبب هذه الكيميائيات السرطانية السرطان من نفسها، ولكن بدلا من ذلك، تجهز المسرح (بطفرة ؟) للترغيب فيها بعد بالأصابة بالسرطان بواسطة المروج، وقد يمر وقت طويل بين الخطوة الأولى والثانية. وفي الأنسان، لا تظهر الأورام السرطانية في الغالب إلا بعد سنوات من التعرض إلى مسبب معروف للسرطان (الشكل ١٩-٩).

٢ ـ العوامل المسببة للسرطان: CARCINOGENIC AGENTS

تم في الباب الثاني عشر فحص الدليل على أن الإشعاع (مثل أشعة إكس، والأشعة فوق البنفسجية) وبعض الكيميائيات تسبب الطفرات. وبواسطة - وعلى مجال واسع - نفس هذه العوامل يحدث السرطان كذلك.

٣ ـ الإشعاع : RADIATION

ربما يمكن لأي شكل من أشكال الإشعاع بموجات طولية أقصر من موجات الضوء المرئي أن يسبب السرطان إذا ما استطاع أن يخترق أنوية الخلايا. وتعتبر الدقائق تحت الذرية (Subatomic) التي تستطيع اختراق الخلايا من مسببات السرطان. وأظهرت عدة دراسات على أفراد تعرضوا إلى مستويات فوق متوسطة من الأشعاع (مثل العاملين في مجال الأشعة أنفسهم) أن الجرعات المرتفعة نسبيا من الأشعاع تؤدي إلى معدل فوق المعتاد من الأصابة بالسرطان. ولسوء الحظ، فأن المدة الطويلة بين التعرض وظهور المرض، مضافا إليه الحقيقة بأننا في حياتنا اليومية معرضون للكثير من المسببات السرطانية، يجعل من الصعب التأكد من مدى خطورة الجرعات المنخفضة من الأشعاع. ويوجد احتمال واحد هو أنه توجد جرعة مثلى والتي إذا ما قلت جرعة الأشعاع عنها يمنع ال (DNA)، وهو المسئول عن ميكانيكية الأصلاح في الخلية، السرطان من



الشكل ١٩-٩. المعدل المتأخر بين مستهلكي السجائر والوفيات من سرطان الرئة بين الرجال (ملون) والنساء في انجلترا. بالكثير من مسببات السرطان يحدث السرطان بعد التعرض بمدة طويلة (مأخوذة من التدخين والصحة الان، شركة نشربتهان الطبية والعلمية).

الظهور. والاحتمال الآخر هو أنه لا توجد أية جرعة من الأشعاع - مهما صغرت - تكون غير قادرة على إحداث السرطان، ولكن تأثير تلك الجرعات المنخفضة يكون صغيرا جدا ومتأخرا لدرجة أنه لا يمكن تدارك هذا التأثير. في أي تعداد يكون نحو خمس هذا التعداد معرضا للأصابة بالسرطان على أية حال. وبينما تعتبر تلك الأسئلة صعبة الأجابة، إلا أنه من المهم التأكد من أن أي مجهود يؤدي إلى الأجابة عليها يمكننا من إيجاد مستويات معقولة للتعرض للإشعاع من الهيئات الطبية والمهنية (أنظر الشكل ١٢-٢١).

٤ ــ الكيميائيات السرطانية : CARCINOGENIC CHEMICALS

إن حياتنا محاطة بالكيميائيات - كيميائيات منتجة صناعيا وأخرى موجودة في الطبيعة في، على سبيل المثال، الغذاء الذي نأكله. هل يمكن لتلك الكيميائيات إحداث السرطان؟ والاجابة على كثير منها بنعم، هل هي، حقيقة تسبب السرطان؟ الأجابة الآن واضحة بنعم لبعضها، وللأخر تكون الأجابة غير مؤكدة. ويمكن اختبار القدرة السرطانية لمركب كيميائي بتغذيته لحيوانات تجارب أو بتعريض تلك الحيوانات له. وكثير من الكيميائيات، إذا ما اختبرت بهذه الطريقة، تحدث زيادة في حالات

ظهور الأورام في تلك الحيوانات. وفي كل حالة، لابد من أن نرفع علم الخطر، ولكن في بعض الحالات، تكون أهمية هذا الأكتشاف غير واضحة دائما. ولسبب واحد، نشأ في الكثير من تلك الحيوانات المستخدمة (مثل الفئران) السرطان بأي حال من الأحوال، إذن فالأنسان يبحث في الواقع عن زيادة مؤكدة إحصائيا فى معدل ظهور السرطان في حيوانات التجارب بمقارنتها بحيوانات قياسية . كما توجد مشكلة أخرى وهي مقدار الجرعات الممكن استخدامها في الأختبار، إذ ربما تعطينا جرعات كبيرة من الكيميائيات نتائج مؤكدة ولكنها لا تدل على مستويات التعرض التي يمكن للإنسان تحملها. فهل يوجد حد أمثل للسلامة؟ فلائحة ديلاني كلوز (Delaney Clause) الخاصة بالأطعمة، والأدوية، ومستحضرات التجميل تعتمد على فرض عدم وجود هذا الحد، وتمنع هذه اللائحة استخدام أي مادة تسبب السرطان في حيوانات التجارب وبأية جرعة في الأطعمة.

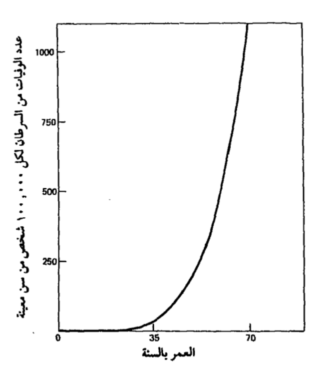
والمشكلة الخاصة بمعرفة عما إذا كانت الجرعات المنخفضة من الكيميائيات تحدث السرطان هي نفسها كما في الأشعاع. فعند الجرعات المنخفضة جدا من الكيميائيات، فأن عدد الحيوانات التي تحتاجها لأظهار زيادة مؤكدة في السرطان يكون كبيرا جدا. وعلاوة على ذلك، فأنه مع عمر يطول إلى ثلاث سنوات أو ماشابه ذلك، تكون أكثر الفئران قد ماتت بسبب كبر السن قبل ظهور تأثير الجرعات المنخفضة للمادة الكيميائية السرطانية. ولربما يمكنك الآن أن تشعر بتقدير أحسن الأراء المضادة التي كانت تدور دائما حول المكتشفات المعملية لمواد السيكلاميتات، والسكارين، والنيتروسامينات، والمواد الهيدروكربونية الموجودة في لحم بقرى مشوى على الفحم، والمركبات الكلورية في أنابيب المياه بالمدن، وغيرها. وبكل تأكيد، فأن عددا من الكيميائيات المستخدمة في الصناعة يكون خطيرا من ناحية تسببه لأمراض السرطان. ومن الأهمية بمكان إتخاذ الأجراءات اللازمة لتقليل تعرض العاملين إلى تلك المواد. وبالنسة للجمهور العام، فأن أوضح صلة بين الكيميائيات والسرطان هي العلاقة بين مدخنى السجائر وسرطانات (الرئة وغيرها) (الشكل ١٩-٩).

وكبديل للأختبارات المعملية لقدرة المسببات السرطانية هو البحث عن وجود علاقة بين زيادة الأصابة بالسرطان في مجموعة من البشر وبين تعرضهم لمادة كيميائية معينة. وكما يوضح الشكل (١٩-٩)، فأن تلك العلاقة واضحة تماما في مدخنى السجاير.

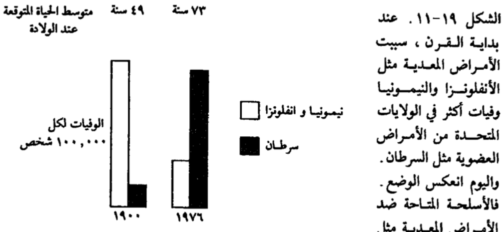
ولكن بالنسبة إلى الكثير من المواد، فأن تلك العلاقة الواضحة لايمكن الوصول إليها، لأن ذلك يرجع جزئيا إلى طول المدة، غالبا عشرات السنين، بين التعرض لمادة سرطانية ونشوء الورم. ويثنى على ذلك أيضا الزيادة الكبيرة في حدوث السرطان الموجود في كل البشر كلما تقدموا في العمر. ويعادل مقدار حدوث السرطان في مجموعة تبلغ من العمر ٧٠ سنة ٦٤ مرة مقدار ما يحدث في مجموعة تبلغ من العمر ٣٥ سنة (الشكل ١٩-١٠). وبينما نجد أن المعدل المرتفع للسرطان من صفات المجتمع اليوم، فذلك يرجع إلى المواد الكيميائية التي نتعرض لها أنفسنا، كما يرجع أيضا إلى الزيادة المحسوسة في متوسط طول عمر الأنسان في هذا القرن. وفي الواقع فإن التقدم في نظم التغذية والصحة العامة في المائة سنة الأخيرة، مسئول جزئيا عن الزيادة في الأصابة بالسرطان، إذ أن هذا التقدم نتج عند تعداد نتوقع منه أن يعيش للعمر الذي يصبح فيه السرطان سببا اساسيا من أسباب الموت (الشكل ١٩-١١).

٥ ــ الفيروسات المسببة للسرطان: ONCOGENIC VIRUSES

ليس هناك شك في أن السرطان يمكنه أن يصيب الكثير من الحيوانات مثل البرمائيات، والطيور، والقوارض، وذلك عن طريق حقن فيروسات معينة. وكل مانحتاج إليه هو طحن نسيج به الورم السرطاني، وإمرار هذا النسيج المطحون من



الشكل ١٩-١٠. معدل **الوفيات من السرطان في الولايات المتحدة كدالة للعمر .**



الشكل ١٩-١١. عند بداية القرن ، سببت الأمراض المعدية مثل الأنفلونزا والنيمونيا وفيات أكثر في الولايات المتحدة من الأمراض العضوية مثل السرطان. واليوم انعكس الوضع. فالأسلحة المتاحة ضد الأمراض المعدية مثل المضادات الحيوية والمناعية، زادت من متوسط طول العمر وسببت في أنه أصبحت الأمراض العضوية هي أكثر أسباب ألوفاة.

مرشح في حيوان التجارب. هل يمكن أن يصبح الأنسان ضحية أيضا للفيروسات المسببة للسرطان؟ وهذا هو أصعب سؤال. وبكل وضوح، لا يمكننا إجراء أختبارات على فيروس مشتبه فيه بحقنه في الأنسان. ومن جهة أخرى، يكون أيضا من الأشياء الغريبة أن تكون هناك ظاهرة منتشرة بشكل كبير بين أفراد المملكة الحيوانية ولا توجد في الأنسان ولو أنه لا يوجد دليل كاف على وجود فيروس يحدث سرطانا في الأنسان، إلا أنه يحتمل وجود مرشحين لذلك. أحد هؤلاء المرشحين هو فيروس إبشتاين – بار (EB - Epstein - Barr) وهو منتشر جدا بين المجتمعات الأنسانية. وفي الأطفال، تسبب الأصابة بهذا الفيروس مرضا خفيفا لا يستمر طويلا. وفي المراهقين والبالغين حديثا، يسبب هذا الفيروس مرضا يسمى مونونيوكليوزس أي وحيد النواه (Mononucleosis): وهو مرض ينتج عنه تشتت مؤقت لا يمكنا التحكم فيه لكرات الدم الليمفاوية (Lymphocytes). والأفراد ذوي نقص في الجهاز المناعي ينشأ بأجسامهم سرطان لهذا النوع من كرات الدم يسمى ليمفوما (Lymphoma). ، في بعض الحالات (وليس كلها)، يسبق مرضها الأصابة بالمونونيوكليوزس. وفي كل حالة فإن الخلايا السرطانية تكون مصابة بالفيروس (EB). إذن فإن الفيروس (EB) المذكور قد يكون كذلك فيروس للسرطان في الأنسان ويشجعه على ذلك توافر عامل في العائل نفسه (مثل مستوى المناعة).

وغالبا ما تأتي المعرفة بعلوم الحياة من دراسة الوظائف غير العادية (مثل

الطفرات). وبكل تأكيد يمكنك مشاركتي في التمنى بأن الأبحاث على السرطان قد تؤدى بالتالي لقيادتنا إلى الطرق التى نكافح بها هذا المرض الفظيع بفعالية أكبر عما يمكننا عمله الآن. ولكن بينما نحن نكافح للوصول إلى هذا الهدف، يجب أن نتعلم أكثر عن خواص الخلايا الأساسية: الجينات التي تتحكم فيها، والأشارات المرغبة التي تمر بينها، وأكثر من ذلك.

الشيخوخة: AGING

١٩-٥. الشيخوخة - الحقائق: AGING - THE FACTS

يمكن أن يطلق على الشيخوخة أنه تدهور مستمر، بمرور الوقت، لتراكيب ووظائف كائن بالغ، ويؤدي هذا بالتالي إلى موت الكائن. فإما أن يجعل الفقد الزائد في الوظيفة الكائن على عدم المقدرة على تحمل الأمراض الوبائية أو، في الغالب، فشل بعض الأعضاء الحيوية مما يعجل بموت باقي الأعضاء.

وكانت دراسة الشيخوخة مهملة منذ وقت طويل، ولكن بما أنه أمكن الآن التحكم في أمراض الأنسان الوبائية باللقاحات، ومستحضرات السلفا، والمضادات الحيوية، أصبح الكثير من الناس يعيشون إلى عمر يصبح فيه عدم عجزهم عن العمل مشكلة بسبب كبر السن. ولأجل هذا، أصبح مهما الآن البحث في مشاكل الشيخوخة. وحول الكثير من الأطباء وعلماء الأجتماع والفسيولوجيا والكيمياء الحيوية والكثيرون غيرهم، إهتمامهم إلى مشكلة الشيخوخة. وليست الشيخوخة في الأنسان فقط هي التي أصبحت موضع الدراسة، بل أيضا في الكثير من الكائنات الأخرى والتي يمكن أن تكون خيطا لتفهم طبيعية تلك الشيخوخة. و كنتيجة لتلك الدراسات، تظهر حقيقة واحدة، ألا وهي أن تأثير زيادة العمر يختلف كثيرا من كائن إلى آخر.

وبين البكتيريا، لا توجد عملية كبر السن (الشيخوخة)، فأذا ما كبرت خلية فإنها تنقسم إلى خليتين، وهاتان تكرران العملية وهكذا. ولو أن تغيرات كثيرة في البيئة قد تقتل خلية بكتيرية، إلا أنه لم يعرف حتى الأن موت خلية بسبب الشيخوخة. ولهذا السبب، فلقد وصف بعض علماء الأحياء البكتيريا بأنها يمكنها أن تكون خالدة. وبينما فكرة خلود البكتيريا لها استحقاقها، إلا أن إضافة الكائنات وحيدة الخلية إلى مجموعتها لايعد صحيحا.

وكان يعتقد في وقت من الأوقات أن أخذ خلايا، بل حتى أنسجة، من حيوانات وزراعتها في المعمل يمكن أن ننقل إليها صفة الخلود كما هو الحال في البكتيريا المرباه على بيئتهـا. وعلى أية حال، ليس الوضع بتلك البساطة. وفي الحقيقة، فإن بعض خلايا الشـدييات يمكن تكاثرها إلى ما لا نهاية، ولكن في كل حالة، لا تكون تلك الخلايا عادية، إذ يكون بها عدد من التشوهات، من بينها مجموعة كروموسومية (Karyotype) غير عادية (أنظر قسم ١١-٤)، كذلك، عموما، القدرة على النمو إلى ورم سرطاني إذا ما زرعت في النوع الذي أخذت منه تلك الخلايا. وفي الحقيقة فأن كثيرا من المزراع الناجحة الطويلة العمر مأخوذة من السرطانات. فخلايا هلا "Hela" على سبيل المثال، التي تربى الآن في المعامل في جميع أنحاء العلم، كانت منذ سنوات طويلة من سرطان عنق إنسان.

ويمكن تربية الخـلايا الشـديية العادية معمليا، ولكنها عادة لا تمر في أكثر من ٥٠ أنقساما خلويا قبل أن تتدهور تلك الخلايا في نشاطها وتموت. ومما يدعو إلى التشويق، يمكن للخلايا المأخوذة من ثدييات صغيرة أن تمر في أجيال أكثر مما يمكن أن تمر بها الخلايا المأخوذة من ثدييات أكبر سنا، وهذا يجعلنا نعتقد أن خلايا الحيوانات الثديية لها حدود موروثة في عدد إنقساماتها التي يمكنها القيام بها، سواء أكانت مرباه حيويا أو معمليا.

ويتفق كل انسـان على أن الكائنات متعددة الخلايا مآلها للموت، إذ ربما فقدت خلاياها صفة الأستقلالية. وعند التخصص لأداء وظيفة معينة، تهجر تلك الخلايا المتخصصة وظائف حيوية أخرى وتتركها للخلايا المجـاورة، فأذا ما أصاب مرض أو أي ضرر آخر أي مجموعة من تلك لخلايا المتخصصة، فإن باقي الخلايا يصيبها الفشل أيضا. ولذلك فأن فشل القلب ينتج عنه الموت السريع لجميع خلايا الجسم مهما كانت قوية وصحيحة

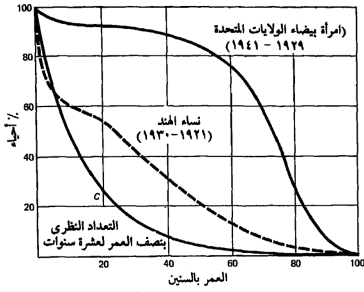
ولو أن جميع الكائنات متعددة الخلايا مآلها للموت، فلا يكون دقيقا عندئذ إذا قلنا أن سبب ذلك هو الشيخوخة. إذ أنه يمكن لبعض الكائنات تفادى الشيخوخة وأثناء ذلك، يمكنها إدراك عمر طويل قياسي. فبعض الأنيمونات البحرية معروف عنها أنها عاشت نحـو ٧٨ سنة، ويمكنها الوصول الى هذا العمر الطويل وتفادى الشيخوخة بتجـديد أجـزاء جسمها القديمة دوريا. والأشجار الخشبية المستديمة تقع في نفس

المجموعة، إذ أنها في أثناء حياتها تنتج كل عام أنسجة وعائية جديدة، وأوراق، وأزهار، ولا تبدى أي ظاهرة من ظواهر الشيخوخة، ولو أن معدل نموها يقل مع تقدم السنين. وأخيرا، فالمرض أو عدم القدرة على حماية حجمها الكبير المتزايد ضد فعل الريح أو كتل الجليد يؤدى إلى موت تلك الأشجار، والذي قد لا يحدث إلا بعد مدة طويلة. ويوضح تحليل الحلقات الخشبية أن بعض أشجار الصنوبر في شرق كاليفورنيا يزيد عمرها عن ٤٠٠٠ سنة (الشكل ١٩-١٢). وفي وقتنا الحاضر، يبدو أن هذا يعتبر رقما قياسيا في طول عمر الشجرة، ومع ذلك لاحظ أنه، على أية حال، لاتوجد خلايا حية في هذه الأشجار يزيد عمرها عن بعض السنين القلائل.

ويبدو أن بعض الأسماك والزواحف تتفادى، أو على الأقل تمنع، الشيخوخة بأستمراريتها في النمو طوال حياتها. ولا نعرف ماذا يجلب الموت لها، ولكن ربما ببساطة يكون سببه نفس العوامل التي تسبب الموت في الأفراد الأصغر من نفس الأنواع: المرض أو الأفتراس. وكل تلك المتحديات للحياة، تعمل كلية بطريقة عشوائية، وبالتالي تصيب جميع أفراد أي جيل من الأجيال (الشكل ١٩-١٣).



الشكل ١٩-١٢. أشجار الصنوبر *Pinus aristata* النامية في الجبال البيضاء في شرق كاليفورنيا. تحليل الحلقات السنوية أثبت أن عمر الأشجار أكثر من ٤٠٠٠ سنة (بتصريح من والتر جيراش).



الشكل ١٩-١٣. منحنيات الأحياء الممثلة المنحنى (أ) نموذجي للكائنات المسنة ولكنها تعاني وفيات قليلة متفرقة قبل ذلك. تعدادات النباتات لها نفس المنحنى. المنحنى (ب) يمثل تعدادات نموذجية والتي فيها العوامل البيئية مثل الجوع، الافتراس، والأمراض التي توضح آثار الشيخوخة. المعدل المرتفع في وفيات الأطفال يميز على الخصوص الكائنات التي لا تقوم بأي عناية لصغارها. المنحنى (ج) منحنى نظري للكائنات التي فيها فرصة الوفاة متساوية في كل الأعمار. وقد يكون هذا حقيقيا للكائنات من الطيور المفردة في الأدغال) تعني من موت عشوائي بسبب هرسها قبل وقت شيخوختها.

وربما يكون حقيقة كذلك أن الأسماك والزواحف تصبح أقل مواءمة مع بيئتها إذا ما زادت عن حجم معين. وعلى أية حال، فان القدرة على النمو بثبات، حتى ولو ببطء، يبدو و كأنها حماية لتلك الكائنات من الآثار الضارة للشيخوخة. وقدر لبعض السلاحف البحرية أنها تعيش أكثر من ١٥٠ سنة.

ويختلف الموقف بين النباتات الحولية (مثل النجيليات والكثير من الحشائش) والثدييات. فأغلب النباتات الحولية تنمو بقوة لفترة ثم تكون الأزهار ثم الثمار، ويصاحب الإثمار إنخفاض واضح في النمو. وبتوقف النمو البطيء، تحدث تغيرات أخرى أيضا، إذ يختفي جزء كبير من الكلوروفيل من الأوراق، ويزداد معدل التنفس (وبالتالي بناء وتغيير المادة) زيادة ملحوظة، ويتبع ذلك الكثير من التغيرات التشريحية. كل تلك التغيرات تكون الشيخونة وتنتهي بموت النبات. ومن المهم معرفة أن هذه التغيرات ليس من الضروري أن يكون لها علاقة بالتغيرات العكسية في البيئة الطبيعية، فقد تحدث

الشيخوخة في النبات الحولي بالرغم من وجود رطوبة متوفرة، وعناصر في التربة، وضوء الشمس، وحرارة دافئة.

والثدييات، كما شاهدنا، تنمو إلى حجم معين ثم تقف. وبعد توقف النمو لبعض الوقت، يبدأ النمو ثانية. ويختلف طول فترة الحياة من نوع إلى أخر، ففأر التجارب في المعمل والذي يبلغ من العمر ثلاث سنوات يعتبر عجوزا جدا، وفي الأنسان، ولو أن تدهوره بسبب الشيخوخة يمكن إكتشافه عند بلوغة الثلاثين سنة من العمر، ولكن الفقد المميت للوظيفة قد لا يحدث إلا بعد هذا العمر بكثير.

فما هي إذن أعراض الشيخوخة؟ فإنخفاض القوة العضلية، وانخفاض قدرة

الشكل ١٩-١٤ : الفقد في التركيب والوظيفة بسبب الشيخوخة. وتوضح الأرقام النسب المئوية لوظيفة معينة باقية في رجل يبلغ من العمر ٧٥ سنة، بالمقارنة بما يوجد في رجل عمره ٣٠ سنة، والقيمة الأخيرة مأخوذة على أنها ١٠٠٪:

وزن المخ	٥٦٪
تزويد الدم للمخ	٨٠
إنتاج القلب وقت الراحة	٧٠
عدد حويصلات الكلية	٥٦
معدل ترشيح الحويصلات	٦٩
سرعة العودة إلى درجة الحموضة (pH) الطبيعية للدم بعد تجدده	١٧
عدد براعم الذوق	٣٦
القدرة الحيوية	٥٦
قوة قبض اليد	٥٥
أقصى كمية من الأكسجين الذي يستنشقه الأنسان عند التدريب	٤٠
عدد الزوائد العصبية (Axons) في عصب شوكي	٦٣
سرعة نبض العصب	٩٠
وزن الجسم في الذكور	٨٨

الـرئتين، وانخفاض دفع الدم من القلب، وانخفاض تكوين اليوريا في الكليتين، ومعدل التمثيل الحيوي، ما هي إلا أمثلة قليلة من تغيرات الجسم الكثيرة التي تحدث عند الشيخـوخـة. ويوضـح الشكل (١٩-١٤) بعض الأمثلة الأخرى للتدهور في الوظائف والتراكيب التي تحدث عند عمري ٣٠ ، ٧٥ سنة.

لماذا تفقد أعضاء الجسم المختلفة قدرتها على أداء وظائفها جيدا بالتدريج؟ هناك إجابة واحدة وهي أنها تفقد الخلايا التي تتكون منها. فكثير من أعضاء الجسم تفقد من وزنها مع الشيخوخة (الشكل ١٩-١٤)، وحتى الأعضاء التي لا تفقد من وزنها شيئا فإنها تفقـد الخلايا المتخصصة التي تمكنها من أداء وظائفها، وقد يمكن لهذه الخلايا تعويضها عن طريق النسيج الضام أو خلايا النسيج الدهني، وعلى أية حال، يبقي الوزن الكلى للعضو ثابتا. ومن الطريف ملاحظة أن الأعضاء التي تفقد الكثير من قدرتها على أداء وظيفتها (وبهذا تظهر الكثير من الشيخوخة) هي الأعضاء التي أصبحت خلاياها لا تنقسم بنشاط، ومن تلك الأعضاء القلب والمخ والكليتين والعضلات. ومن ناحية أخرى، فإن الأعضاء التي مازالت خلاياها تقوم بعمليات إنقسامها بكفاءة (مثـل نخـاع العظام، والكبد، والبنكرياس) فانها لا تبدى أي فقد في وظيفتها مع الشيخوخة. ويذكرنا هذا الموقف بالشباب الدائم لخلايا البكتيريا السريعة الأنقسام.

١٩-٦. الشيخوخة - النظريات : AGING - THE THEORIES

ما سبب تدهـور التغـيرات بسبب الشيخـوخة؟ هذا هو أحد الأسئلة من ضمن الأسئلة العـديدة الغير قابلة للأجابة في البيولوجيا. ولقد قدمت عدة أقتراحات عن أسبـاب الشيخـوخة، ولكن الحقائق المعروفة عن الشيخوخة لا زالت قليلة جدا إما لأثباتها بالحجة أو لا نأخذها في الأعتبار.

و تشرح إحدى النظريات الشائعة الشيخوخة بأنها عاقبة (أي تعقب) الحياة، أي أنه، كلما أسرعت حياة الكائن، كلما أسرع في بلوغه إلى الشيخوخة. فالحياة السريعة معناها التباين السريع والنمو، وتعنى أيضا معدل مرتفع من التمثيل الغذائي. وحقيقة فإن الثدييات، مثل الفئران، والتي تصل إلى طور البلوغ بعد عدة أسابيع من ولادتها، تشيخ بسرعة أكبر بكثير من الثدييات مثل الأنسان والذي يستغرق سنوات حتى يصل إلى طور البلوغ.

ويوجد طريق واحد لاختبار تلك النظرية وهو إيجاد طريقة ما يمكنها من إبطاء معدل نشوء الكائن. ولقد وجد أن تغذية الفئران الصغيرة على الغذاء الذي يكفيها فقط لبقائها على قيد الحياة يقوم بهذه المهمة. فإذا ما أعطيت تلك الفئران غذاء كافيا، فإنها تصل سريعا إلى صفات مثيلاتها المرباه عاديا من جميع الوجوه. وفي الحقيقة، فإنها تصبح قادرة على أن تعيش في راحة لمدة أطول بعد وفاة مثيلاتها المغذاه جيدا.

وتوجد نظرية أخرى والتي تربط الشيخوخة بالحياة وتسمى نظرية كلنكر "Clinker" وطبقا لهذه النظرية، فإن كل خلية لابد وأن تجمع موادا تالفة سامة بداخلها طوال حياتها. ويقلل هذا التجمع بالتدريج قدرة الخلية على أداء وظيفتها، وبذلك تشيخ الخلية. ويدعم هذه النظرية إكتشاف كميات كبيرة من الحبيبات داخل خلايا الأفراد كبيري السن، وخاصة الخلايا التي لا تنقسم مثل خلايا العضلات والأعصاب. أما عن الخلايا سريعة الإنقسام، كالتي توجد في الكبد، فإنها تحتوي على حبيبات أقل بكثير. (وهل تتذكر بأن الأعضاء التي تحتوي على خلايا لا يستمر فيها الإنقسام طوال حياتها هي الأعضاء التي تشيخ أكثر). ولو أن الطبيعة الكيميائية لهذه الحبيبات غير معروفة حتى الآن، الا أنه يوجد دليل على أنها - أي الحبيبات - تمثل بقايا عضيات خلايا قديمة ممزقة (مثل الميتوكوندريا) والتي كانت منضمة إلى الليسوسومات.

ولماذا لا تستطيع الخلية أن تخلص نفسها من تلك المواد الضارة ؟ ربما يرجع ذلك إلى أن الخلايا القديمة أقل قدرة على تخليص نفسها من أية مواد. فمادة الكولاجين، وهو المركب البروتيني الرئيسي في الجسم، يوجد في الغلاف الذي يحيط بالخلايا أو في داخل (Matrix) أغلب خلايا الجسم. والكولاجين عند ابتداء تخليقه يكون مرنا وسهل الذوبان، وبمرور الوقت، تصبح سلاسل عديدات الببتيدات - والتي يتكون منها الكولاجين - أكثر ارتباطا ببعضها البعض، مما يقلل من درجة ذوبانها ومرونتها. والحقيقة المؤكدة هي أن الأعضاء والأنسجة (مثل الجلد) في الحيوانات الكبيرة السن تصبح أقل مرونة بتقدم العمر، ومن الحقيقة أيضا أن الكولاجين المسن يعمل كحاجز يمنع المواد سهلة المرور من وإلى الشعيرات الدموية،وربما أيضا، من وإلى الخلايا. وأمكن أكتشاف أنخفاض النفاذية في الرئات والكلى والجلد في الحيوانات المعمرة. وعلى سبيل المثال، إذا ما حقن هستامين تحت الجلد، تصبح الشعيرات الدموية أكثر شفافية، وتزيد كميات البروتين النافذة إلى فراغات الأنسجة. وعلى أية حال، فإن أهمية هذه

الأستجابة تقل كثيرا في الحيوانات كبيرة السن. ويوضح إنخفاض الشفافية كذلك لماذا يعمل الكثير من الأجهزة المنظمة للجسم بطريقة أبطأ مع تقدم العمر.

فإذا ما كانت شيخوخة الكولاجين هي الساعة التي تحدد وقت الشيخوخة للكائن بأكملة، يمكن أن نرى لماذا لا تشيخ الحيوانات طالما أنها مستمرة في النمو. فالنمو يعني إذن إستمرارية خلق كولاجين جديد وحديث، وبالتالي يبطيء دقات الساعة.

ولكن لماذا يكون الكولاجين في فأر عجوز توقف عن النمو منذ نحو السنتين في نفس شيخوخة رجل عمرة ٧٠ سنة والذي توقف عن النمو منذ نحو ٥٠ سنة؟ ربما يكون معدل شيخوخة الكولاجين ليس مجرد وظيفة زمنية بسيطة ولكن أيضا بسبب معدل التمثيل الحيوي. وإذا كان كذلك، فأن هذا يمدنا بقاعدة جزئية للنظرية، والتي شرحت قبل هذا الكلام، وهي أن الشيخوخة ماهي إلا نتيجة لمعدل الحياة. فالثدييات الصغيرة عندها، في الحقيقة، معدلات من التمثيل الحيوي أعلى من تلك الموجودة عند الثدييات الأكبر.

وقليل من علماء الأحياء يشعرون بأن الشيخوخة هي إلى حد كبير نتيجة تغيرات عكسية في البيئة، وهم مهتمون على وجه الخصوص بتأثير الأشعاع (مثل الأشعة الكونية، وأشعة إكس) على الجينات في خلايا الجسم أو على بلازما خلايا الجسم. والطفرات في بلازما خلايا الجسم لا يسهل إكتشافها كما يحدث للطفرات في بلازما الخلايا التناسلية (وفي الواقع فإن علم الوراثة بأكملة مبني على النقطة الأخيرة). ولا يوجد سبب للتفكير، مع ذلك، على أن (DNA) في خلايا الجسم يكون أكثر مناعة للطفرات عن ال (DNA) في الخلايا التناسلية. وعند تذكر نظرية جين واحد لكل عديد الببتيد (أنظر قسم ١٣-١)، قد نتوقع من خلايا الجسم وما تقتنيه من طفرات أن تنتج عديدات الببتيدات والبروتينات المنحرفة، ويقلل هذا بطبيعة الحال من كفاءتها أو حتى قد يتسبب في موتها.

وتأييدا لتلك النظرية، برهن عدد من العلماء أنه عندما تبدأ خلايا الأنسان في الشيخوخة (بتنميتها في بيئة)، فإن الخلايا المذكورة تنتج إنزيمات منحرفة. وثعبان الماء الخلي *(Vinegar eel)* الكبير السن (وهو في الحقيقة دودة صغيرة) و حتى مستعمرات النيروسبورا *(Neurospora)* الكبيرة السن تفعل نفس الشيء.

ولقد تم توضيح أن التعرض للأشعة بجرعات تحت مميته، يقلل من طول الحياة المتوقعة للكثير من الحيوانات (الشكل ١٩-١٥). وعلى أية حال، يظهر الأشعاع أقصى تأثيره السيء على الخلايا السريعة الأنقسام (مثل الكبد، ونخاع العظام) والتي تنجو دائما من تأثير الشيخوخة، ويكون تلف الخلايا وموتها في مثل تلك الأنسجة (الكبد ونخاع العظام) مما يمكن تعويضه، إذ يمكن تدمير الخلايا المعيوبة بالليزوسومات وبالخلايا الملتهمة ويحل محلها خلايا جديدة بالإنقسام الغير مباشر. وفي أعضاء مثل المخ والعضلات، حيث لا يوجد إنقسام غير مباشر، تصبح الخلايا التالفة نقطة ضعف دائمة

وكثير من علماء الأحياء يشعرون أن الميل إلى الشيخوخة هي صفة ذاتية (داخلية)، فهم يصرحون بأنه حتى تحت أحسن الظروف البيئية، تشيخ الكائنات عند معدل محدد تبعا لطبيعة جيناتها. ويوجد دليل قوي يدعم هذا الرأي، فلقد رأينا أن النباتات الحولية تشيخ بالرغم من الإبقاء على كل الظروف الطبيعية الملائمة حولها. والإختلافات الواسعة في العمر من نوع من أنواع الثدييات إلى أخر يصعب تفسيرها بدون ادخال العوامل الوراثية في الحسبان وحتى داخل نفس النوع، وتظهر بعض الفروع العائلية حياة أكبر باستمرار عن فروع عائلات أخرى. وأفضل طريقة كي تضمن لنفسك حياة طويلة أن يكون لك أبوين طويلي العمر؟ والحقيقة أنه، كمجموعة، فإن النساء لهن متوسط أعمار أطول من الرجال، وهذا يؤيد أن العوامل الوراثية تقوم بدورها (إنها لا تثبت ذلك، على اية حال. ولم لا؟) ولا تفوق النساء الرجال في الأعمار فقط، بل إن إناث الفئران، والجرذان، وذبابة الفاكهة والعناكب والكثير من الأسماك أيضا، تفوق الذكور في طول العمر .

ويقبل أغلب علماء الأحياء فكرة أن الشيخوخة تنتج عن تداخل بين العوامل الوراثية والعوامل البيئية. ونتيجة لذلك، فإن أغلب النظريات السائدة عن الشيخوخة تعتقد بتداخل هاتين القوتين. ولكن إذا ما كان هناك أي شكل من أشكال الشيخوخة يقع تحت تأثير الجينات، فمعنى ذلك أن الشيخوخة هي جزء من وسيلة عامة للنمو، مثل، كما تقول، التشكل.

ولربما كانت أجمل محاولة لنسج المعلومات المختلفة عن الشيخوخة في صورة ملائمة كانت تلك التي قام بها عالم الميكروبيولوجيا والمناعة والحائز على جائزة نوبل



الشكل ١٩-١٥ . تأثير الاشعاع على الشيخوخة . ثلاثة فئران كلها في عمر ١٤ شهر وكحيوانات بالغة صغيرة، أعطى ٩ فيران جرعات تحت مميتة من الأشعاع، ٩ آخرين تركب بدون معاملة للمقارنة . فئران المقارنة (الى اليسار) لازالت ملساء (ناعمة) وقوية في عمر ١٤ شهر، بينما ٦ من الفئران التي أجرى لها أشعاع ماتت والثلاثة الباقية تظهر علامات الشيخوخة القصوى (الى اليمين) (صورة بحثية للدكتور هوارد ج. كيرتس).

سير/ماكفارلين بورنيت (Sir Macfarlane Burnet). ففي نظريته أن الساعة التي تقيس عملية الشيخوخة هي المعدل الذي عنده تحدث أخطاء في طريقة إصلاح الـ (DNA). وفي الباب الثاني عشر، تمت لنا معرفة بعض العوامل التي تسبب الطفرات. كماتمت معـرفتنا أيضا بالأنزيمات - DNA polymerases ومشابهاتها - والتي تقوم باصلاح الأجزاء التالفة من (DNA). وفقط عند فشل هذه الأنزيمات في وظيفتها تحدث الطفرات. وفي كلمات أخرى، حتى إذا ما تلـف جـزء من ال (DNA) بواسطة أشعة X ، أو الضوء الفوق البنفسجي ، فإن الطفرات لم تكن تحدث إذا ما تم إصلاح التلف جيدا . وكما أن الطفرات الجسمية متجمعة داخل الخلية، تبدأ مجموعة كبيرة من الجينات التركيبية في إنتاج بروتينات متلفة، وهذه قد تقلل من كفاءة الخلية في عدة إتجاهات. ولكن إذا ما صادف أن يكون أحد تلك البروتينات المتلفة من الأنزيمات المسئولة عن إصلاح ال (DNA) فإن ذلـك يسرع من الـطفـرات الجسمية. ونتيجة لذلك، قد تصبح الخلية سرطـانية أو تموت. ولربما كان فقدان الخلايا وهو المميز للأنسجة المكونة من خلايا لاتنقسم، مثل المخ، هو نتيجة التدمير بهذه الميكانيكية.

ويمكن لهذه الطريقة أن تمدنا بالكثير من خواص عملية الشيخوخة والتي دوناها، ولكن كيف يمكنهـا تفسير الشيخوخة السريعة للفأر، بطول عمره الثلاث سنوات،

والشيخوخة البطيئة للأنسان، بعمره الذي يبلغ السبعين؟ وطبقا للعالم برنت (Burnet) فكل نوع - نتيجة لتطوره - اكتسب رموزا جينية لأنزيمات إصلاح ال (DNA) ومفاتيح إنزيمية أخرى ذات درجة من الدقة والكفاءة تخص طول عمر النوع. فهل يوجد دليل على ذلك؟ في عام ١٩٧٤م سجل العالمان هارت (R. w. Hart) ، ستلو (R. B) (Setlow) بعض الأكتشافات التي تتعلق بهذا السؤال. فقد أخذا خلايا من أنواع مختلفة من الثدييات ووضعوها في بيئة نسيجية، ثم قاما بإشعاع البيئات المختلفة بجرعة متماثلة من الأشعة فوق البنفسيجية التي تدمر الـ (DNA) ، ثم قاما بعد ذلك بقياس الكفاءة التي قامت بها إنزيمات الخلايا لإصلاح الضرر. وكما يظهر في الجدول الموجود في الشكل (١٩-١٦) فإن الكفاءة التي أمكن بها الأنواع المختلفة أن تصلح ال (DNA) الخاص بها كانت مرتبطة مباشرة بطول حياة هذا النوع.

وفي بعض الأنواع، مثل فأر المنزل، كانت أفضل استراتيجية للبقاء هي البلوغ

الشكل ١٩-١٦: العلاقة بين طول العمر والكفاءة النسبية لإصلاح (DNA) في خلايا بعض أنواع الثدييات. وفي كل حالة تم إشعاع الخلايا التي تنمو داخل بيئة نسيجية بالضوء الفوق بنفسجي ثم قدرت الكفاءة التي تمت بها عملية إصلاح الـ (DNA) (من إبحاث هارت، ستلو، ١٩٧٤).

النوع	متوسط العمر بالسنة	الكفاءة النسبية لإصلاح الـ (DNA)
الأنسان	٧٠	٥٠
الفيل	٦٠	٤٧
البقرة	٣٠	٤٣
الهامستر	٤	٢٦
الجرذ	٣	١٣
الفأر	٢	٩
الشرو (حيوان شبيه بالفأر)	١	٨

سريعا، والتوالد عن طريق الأخصاب، والموت في عمر صغير. وفي الأنواع الأخرى، مثلنا نحن، كانت أفضل أستراتيجية هي البلوغ ببطء (وتعلم الشيء الكثير أثناء ذلك)، والتوالد (التكاثر) باعتدال، والموت إذا ما تأكدنا من عدم إعطاء المزيد من أجل رفاهية أفراد نوعنا. وطبقا للعالم بورنت (Burnet) فإن الفأر المنزلي ونحن قد ورثنا جينات تمكننا من القيام بأستراتيجية كل منا: فبالنسبة للفأر، جينات تحمل إصلاحات للأنزيمات التي تقوم بعملها مع الكثير من الأخطاء، وبالنسبة للانسان، جينات تحمل إصلاحات لإنزيمات بعيدة كل البعد عن إحداث أي خطأ في العمليات الحيوية الخلوية مثل تكاثر و إصلاح (DNA).

ولربما تشعر بالرعب لوجود الكثير من النظريات التي تشرح عملية حيوية مثل الشيخوخة. وفي الحقيقة، فإن هذا يعتبر طورا عاديا في نمو أي علم من العلوم، فكلما قلت الحقائق المعروفة، كلما زادت النظريات الغريبة. ولا يهم الآن أيا، إن وجد، من تلك النظريات تشرح بكفاءة حقائق الشيخوخة، فالمهم هو أن كل نظرية مستنبطة من الشيخوخة لابد وأن تقترح إجراء تجارب محددة يمكن بها إختبار هذه النظرية. وإذا ما نجحت أي نظرية، أم لم تنجح في التنبؤ بنتيجة التجربة، فتكون على الأقل قد زودتنا بمعلومات جديدة. وكلما عرفنا الكثير عن الشيخوخة، كلما قلت النظريات التي توضح كل الحقائق، وهذا فقط، بعملية التقارب أكثر وأكثر من المعرفة، يمكننا من أن نتمنى إكتشاف حقيقة طبيعة عملية الشيخوخة.

وإذا ما كانت الشيخوخة مرتبطة ولو جزئيا بجيناتنا، فهل من الأمكان إطالة أعمارنا عن طريق التطور؟ ليس هذا متوقعا. وكما سنرى في الباب الثالث والثلاثين، فالخواص الوحيدة التي يمكن لقوي التطور أن تعمل عن طريقها بطريقة إيجابية هي التي تظهر قبل أن ينتهي الكائن من تربية نسله. والبطء الغير طبيعي في الشيخوخة أو إطالته لن يمكن أكتشافها إلا بعد فوات فرصة ظهور هذه الخواص في عدد كبير من النسل. وإن لم تشجع الخواص الموروثة والتي تشجع إطالة الشيخوخة القوة (الشديدة) أثناء سنى التكاثر، فعندئذ يوجد القليل من إمكانية هذه الخواص كي تصبح ثابتة وعامة في العشيرة (التعداد). وبهذه العلاقة، يمكن معرفة كم من الأنواع الحية تبدأ في الشيخوخة بمجرد إنتهاء نشاطها التكاثري.

١٩-٧ : الموت DEATH

يعتبر الموت من نتاج الشيخوخة، إذ كلما أصبحت أجهزة الجسم أقل كفاءة، يصبح الجسم غير قادر على مواكبة ضغوط الحياة. فالعدوي لا يكون من السهل السيطرة عليها، والأنحرافات في كيميائية الجسم لا يكون من السهل تصحيحها. وأخيرا، يفشل أي عضو في القيام بوظائفه الحيوية، والتي يعتمد عليها باقي الأعضاء، وتكون نتيجة لذلك الموت.

وقد تفشل أعضاء أخرى أولا، إذ أننا نحدد الموت في الأنسان بالوقت الذي يقف فيه القلب عن النبض، ولا نندهش لذلك، إذا ما أخذنا في الأعتبار بأن القلب هو الذي يلعب الأدوار في نقل الغذاء والأكسجين إلى الخلايا. وبدون الغذاء والأكسجين تموت خلايا الجسم، وهي لا تموت كلها على أية حال على الفور إذ أنه حتى عندما يكون جسم الأنسان ميتا ككائن نشط، تعيش خلايا مختلفة لمدد قصيرة من الوقت. والخلايا العصبية هي من أوائل الخلايا التي تموت بسبب نقص الأكسجين، وتعتبر بعض خلايا الجلد من أواخر الخلايا التي تموت بمرور الوقت، ومع ذلك فإن كل خلية في الجسم تموت.

وبأختراع الآلات التي تعمل على إستمرارية الدورة الدموية والتنفس لمدد غير محدودة في المرضي الذين فشلت قدرتهم في الإبقاء على هذه الوظائف، أصبح من الضروري أن نعيد مراجعة أصطلاحنا عن الموت. فماذا إذن، يكون التعبير الذي نستخدمه عن الموت؟ وكما سنري في الجزء السابع، أن الجهاز العصبي المركزي هو الذي ينظم أفعال الجسم، فبدون مخ كامل، فلا نكون سوى تجمعات من الخلايا. ولذلك، ففقدان المخ معناه موت الكائن حتى ولو لم تمت خلايا الكائن الأخرى جميعها.

ويتبع موت الخلايا الإذابة السريعة لمحتوياتها، وتوضح طريقة إضمحلال الخلايا بوضوح الحاجة إلى الإمدادات المستمرة من الطاقة للحفاظ على النظام المعقد للمادة والتي نسميها الحياة. وبمجرد إنقطاع الطاقة عن الخلايا، يتلف نظام محتوياتها الدقيق كلية وبسرعة.

ومن الصعب التفكير في كيفية أن موت الخلايا يمكن إعتباره أيضا طورا من أطوار

النمو. ومع ذلك، توجد أمثلة حيث يلعب فيها موت الخلايا دورا هاما في حياة الكائن وربما يكون حدوثه كنتيجة ضوابط جينية محكمة. وأحسن الأمثلة على ذلك تلك الموجودة في الحشرات ذات التطور الكامل، فمن التحول من يرقة إلى عذراء، يموت الكثير من خلايا اليرقة المتخصصة، وتقوم هذه الخلايا الميتة بتزويد المواد اللازمة لتمكين خلايا البراعم الجنينية (خلايا كامنة) الموجودة في اليرقة لتتحول تلك اليرقة إلى عذراء ثم إلى حشرة كاملة، وهذا الموت المنتشر في خلايا اليرقة هو في الواقع طور حيوي في النمو الكلي لهذه الحشرات.

وقد يحدث الموت المبرمج في بعض الأسماك، فاللامبري البحري والسالمون أمثلة معروفة، إذ عند بلوغها طور النضج، تهاجر تلك الحيوانات من المحيط إلى المياه العذبة في الأنهار ومجاري المياه حيث تضع الأناث بيضها، وتخصبها الذكور، وبمجرد أنتهاء هذا العمل، تموت الحيوانات البالغة. وتشبه تلك الظاهرة مثيلتها في النباتات الحولية التي ذكرت من قبل في هذا الباب. فإبعاد الجيل القديم يبدو وكأنه جزء من عملية النمو حيث أن الجنين الموجود الآن في البويضة المخصبة هو الذي يمثل الجيل الجديد.

وفي الأبواب العشرة الأخيرة، أمكننا التعرف على الكثير من أشكال طرق التكاثر. ويقع في مركز كل هذه الأشكال طبيعة وتعبير الضوابط الوراثية داخل الخلايا. وهذه الضوابط، وهي الجينات، تكون مرشدا لنمو الفرد إلى أن يصل إلى البلوغ ومرشدا لمرور الكائن إلى الجيل التالي عن طريق ميكانيكية التكاثر. وحاولنا البحث عن مفاتيح لمعرفة كيفية تنظيم الجينات، على مدى الأوقات ومن خلية إلى أخرى، حتى يمكن للكائن الحفاظ على نفسه وكذلك الحفاظ على النوع. وليس كافيا أن النسخة المختارة للجينات أن تكون قادرة على إنتاج كائن بالغ يقوم بوظائفه، فلا بد من إستمرارية الجينات أن تعمل إنتخابياً (Selectively) حتى يستطيع الكائن الإستجابة للتغيرات التي ستواجهه حتى حدوث الموت في النهاية. ولابد لكل خلية متباينة في جسم الكائن أن تكون قادرة على أن تكيف ضوابط قدراتها الجينية للأستجابة للتغيرات التي تحدث خارج وداخل الكائن. أما عن كيفية تنظيم الكائنات عديدات الخلايا لأنشطة خلاياها فسيكون ذلك هو موضوع الجزئين السادس والسابع من هذا الكتاب.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تنمـو الكائنات بأخذها موادا من بيئتها أكثر مما تعطي إلى تلك البيئة كفضلات تمثيلها الحيوي. وتتجمع تلك المواد في تراكيب مميزة بالكائن، وقد يؤدي ذلك إلى زيادة في عدد الخلايا، أو حجمها، أو كمية المواد (Matrix) الموجودة خارج الخلايا، أو كل ذلك.

والتجـديد هو إحلال الأجزاء المفقودة أو التالفة، وكما في النشوء الجنيني، يشمل التجديد تباين الخلايا وتنظيمها في نموذج محكم، وفي الفقاريات تقل قوة التجديد عادة مع تقدم العمر.

والسرطان هو تكاثر في الخلايا لا يمكن السيطرة عليه. ويبدأ كل سرطان كخلية واحدة شاذة تنقسـم بدون سيطـرة عليها لإنتاج مجموعة متماثلـة (Clone) هو الورم السرطـاني الأولى. وتميل السرطانات إلى الإنتشار، أي أن الخلايا تنفصل بعيدا من الورم الأولى وتنمو أورام جديدة في أماكن أخرى من الجسم. والخلايا السرطانية هي خلايا متباينة جزئيا وتشبه الخلايا الجنينية في طرق شتى.

والتغير المضبوط الذي يجعل الخلية في أن تصبح سرطانية غير معروف. ومهما كان التغـير، فإنـه ينتقـل إلى جميع الخـلايا الناتجة من الخلية الأصلية كأي صفة جينية. والإشعـاع وبعض المواد الكيميائية التـي تسبب الطفرات تسبب أيضا السرطانات. ويسبب بعض السرطانات في حيوانات التجارب فيروسات، وقد يكون هذا هو نفس الشيء في الأنسان.

وتشمل الشيخوخة إستمرارية إضمحلال تركيب و وظيفة الكائن. والشيخوخة ميزة خاصـة لتلك الكائنات التي تتوقف عن النمو بعد وصولها إلى حجم معين. وسبب الشيخوخة غير معروف، ولكن يوجد دليل قوي على أنها صفة ذاتية وداخلية للكائن وخلاياه.

ولـو أن سبب المـوت هو في الغـالب عامـل خارجي، إلا أن الموت يصيب جميع الكائنات وحتى تحت العوامل البيئية المثلى. وفي كثير من الحالات، يبدو أن الموت طور مبرمج وراثيا من أطوار النمو، وفي كثير من النباتات والحيوانات يحدث الموت عند إنتهاء

التكاثر الجنسي .

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ لخص الميكانيكية التي بها يتحول البروتين البقرى الذي تأكله إلى بروتينات خاصة بك .

٢ ــ ما هو متوسط عدد أوقات الأنقسام التي لابد لكل خلية من خلايا الطفل حديث الولادة أن تقوم بها لإنتاج رجل بالغ .

٣ ــ ماهو أفضل وصف لكائن ينمو بنشاط ، المتوالية العددية أم المتوالية الهندسية ؟ لماذا ؟

٤ ــ يشترى مطعم ١٠٠٠ كوب ماء كهرماني، وينكسر يوميا في المتوسط كوب كهرماني واحد، كل كوب مكسور يستبدل بكوب أخر مصنوع من زجاج شفاف. ماذا يكون شكل منحنى الأكواب الكهرمانية المتبقية؟

٥ ــ ما هو الكائن من الكائنات التالية الذي تتوقع أن يكون له نفس منحنى البقاء الموجود في السؤال الرابع :

(أ) الأفراد المتساوين في العمر في الولايات المتحدة الأمريكية ،

(ب) الأفراد اللذين عاشوا في العصور قبل التاريخ ،

(ج) الببغاوات في الأقفاص ،

(د) العصافير في الطبيعية ،

(هـ) التماسيح في الطبيعة .

٦ ــ ما نوع الطعام الذي تأكله فراخ الضفدعة؟ ماذا تأكل ضفدعة بالغة؟ ما الدلالة في إختلاف نوع الغذاء؟

٧ ــ أكتب قائمة بكل العوامل التي يمكنك أن تفكر فيها والتي تؤثر في النمو في الأنسان .

٨ ــ ماهي أعضاء جسم الأنسان التي تجدد الأجزاء التالفة منها بسهولة أكبر؟ ما هي أعضاء جسم الأنسان التي تظهر فيها التغيرات الأضمحلالية بأقل ما يمكن عند الشيخوخة؟ .

٩ ــ كيف تقارن القائمتين اللتين أعددتهما للسؤال رقم ٨؟ ما هو الشرح الذي

يمكنك إعطاؤه لذلك؟

١٠ ــ في أي الأوجه تتشابه عمليتي التجديد والنشؤ الجنيني؟ وفيم تختلفان ؟

REFERENCES المراجع

1- BRYANT, P. J. SUSANV. BRYANT and V.FRENCH "Bilogical Regeneration and Pattern Formation," Scientific American. Offprint No. 1363, July, 1977.

2- CAIRNS, J., "The Cancer Problem", Scientific American, Offprint No. 1330, November, 1975. What cancer is and how life style influences the incidence of cancer in a population.

3- CAIRNS, J., Cancer: Science and Society. Freeman, San Francisco, 1978. A masterful account of the biology of cancer as well as the impact of cancer on society and vice versa. In paperback.

4- CROCE, C. M., and H. KOPROWSKI, "The Genetics of Human Cancer," Scientific American, Offprint No. 1381, February, 1978. How the incorporation of genetic information carried in the SV40 virus into chromosome 7 transforms human cells growing in culture into cancer cells.

5- NICOLSON, G., "Cancer Metastasis," Scientific American, Offprint No. 1422, March, 1979.

6- FOLKMAN, J., "The Vascularization of Tumors," Scientific American, May, 1976.

7- HAYFLICK, L., "The Cell Biology of Human Aging," Scientific American Offprint No. 1457, January, 1980.

8- WOOLHOUSE, H. W., Aging Processers in Higher Plants, Oxford Biology Readers, No. 30, Oxford University Press, Oxford, 1972.

9- KOHN R. R., Principles of Mammalian Aging, Foundations of Developmental Biology Series, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1971.

10- BISHOR, J. M., "Oncogenes," Scientific American, Offprint No. 1513, March, 1982. Explores the relationship between the cancer-causing genes of certain viruses and similar genes found in normal as well as cancerous cells.

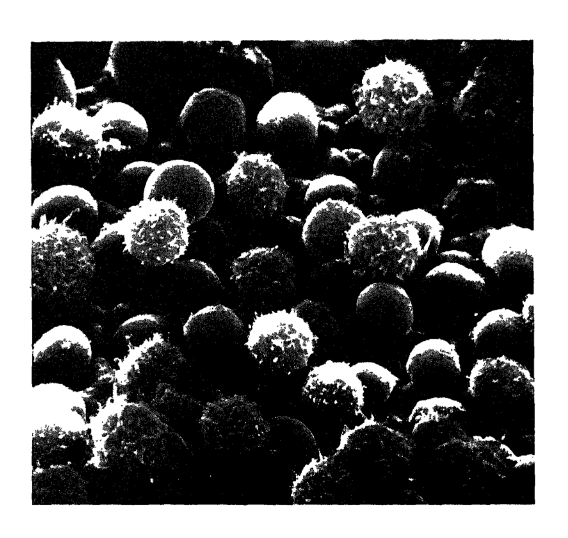


PART VI

القسم السادس

تنظيم البيئة الداخلية

REGULATION OF THE INTERNAL ENVIRONMENT





CHAPTER 20 الباب العشرون

HETEROTROPHIC NUTRITION التغذية الشاذة

الباب العشرون

التغذية الشاذة

٢٠-١ . مقدمة : INTRODUCTION

قمنا في الباب السادس بدراسة بعض خواص السائل الزائد (ECF) ولربما أن الميزة الكبرى للكائنات عديدات الخلايا بما بها من خلايا متباينة متخصصة، على الكائنات الأخرى وحيدة الخلية هي قدرتها على تنظيم هذا السائل الخلوي الزائد (ECF) في خلاياها. والدراسة الفسيولوجية للكائن عديد الخلايا هي، بمقياس كبير، دراسة آلة يمكن بها الحفاظ على تركيز الجلوكوز، أ٢ ، ك أ٢، الصوديوم (Na) ، الهيدروجين (H') ، الماء (H_2O) وغيرها في هذا السائل الخلوي الزائد في حدود ضيقة، ويطلق على خاصية الحفاظ على المكونات الثابتة نسبياً والخواص الأخرى للسائل الخلوي الزائد تعبير هوميوستاسز (Homeostasis).

ويصل التحكم الهوميوستاسي في (ECF) إلى أقصى درجات الدقة في الطيور والثدييات. ففي تلك الكائنات، فأن تلك الآلة الهوميوستاتية، والتي يمكن تصنيعها بتباين الخلايا، تزود الخلايا ببيئة ثابتة ومثالية. وتدين الطيور والثدييات إلى حد كبير في مواءمتها للبيئة إلى حقيقة أن خواص سائلها الخلوي الزائد، أي بيئتها الداخلية (Inter-nal Environment) يبقى ثابتاً غير متغير بالرغم من المتغيرات الكبيرة في بيئتها الخارجية (External environment) ، ومنذ أكثر من قرن، إكتشف عالم الفسيولوجيا الفرنسي كلودبرنارد (Claude Bernard) العديد من العوامل الميكانيكية التي يستطيع بها حجم الحيوان الثديي أن يحافظ على الهوميوستاسز الخاصة به. ولقد أذهلته تلك المكتشفات وجعلته يكتب ما يلي: أن ثبات البيئة الداخلية هي حالة من حرية واستقلالية الحياة.

و في أبواب الجزء السادس، سنختبر عدداً من الآلات (الماكينات) الفسيولوجية التي تستطيع بها الكائنات أن تحافظ على تحكمها الهوميوستاتي أي خواص سائلها الخلوي الزائد (ECF) كما سنقوم أيضاً بدراسة بعض الآلات التي تدافع بها الفقاريات عن عالمها الداخلي من الطفيليات المهاجمة.

ولنختبر أولاً الطرق التي يمكن بها للكائنات الشاذة التغذية أن تضمن مدداً ثابتاً من المواد الغذائية العضوية لمقابلة الاحتياجات الخلوية بها.

٢٠-٢ : متطلبات التغذية الشاذة

REQUIREMENTS OF HETEROTROPHIC NUTRITION

تحتاج جميع الكائنات مدداً ثابتاً نسبياً من المواد والطاقة من البيئة حتى يمكنها أن تبقى على قيد الحياة. وفي كثير من تلك الكائنات، يأتي هذا المدد الرئيسي من المواد والمصدر الوحيد للطاقة من جزيئات عضوية معقدة نسبياً، وغنية في الطاقة، يمكن الحصول عليها بطريق مباشر أو غير مباشر من البيئة. (ما هو المصدر النهائي لتلك الجزيئات؟). فالتغذية التي يتدخل فيها الاعتماد على جزيئات عضوية مجهزة تسمى تغـذية شاذة Heterotrophic. فالأحياء الـدقيقـة الخـالية من الكلوروفيل، والنباتات القليلة الغير خضراء، وجميع الحيوانات، كلها شاذة التغذية.

فالجزيئات العضوية التي تستخدم كمصدر للمادة والطاقة هي السكر، والأحماض الأمينية، والأحماض الـدهنية، والجليسرول، (لأغـراض التخليق synthesis فقط) والفيتـامينـات. وليست كل شواذ التغذية تعتمد على كل تلك الجزيئات العضوية. فبعض الأحيـاء الـدقيقـة على سبيل المثـال، البكتيريا *E. coli*- تنمو على سكر فقط كمصدر لطاقتها، لكنها مع ذلك لابد لها من الحصول على بعض المواد الغير عضوية مثل النيترات كي يمكنها تخليق جميع مكوناتها العضوية الأخرى.

ويتـطلب الانسان الكثير من إحتياجاته من الجزيئات العضوية المجهزة، ويحتاج أيضاً علاوة على ذلك إلى مصدر كربوهيدراتي يحصل عليه جاهزاً، وثمانية من العشرين حامض أميني لاستخـدامهـا في تخليق الـبروتينات (وهي التي يطلق عليها الأحماض الأصلية الأساسية - (الشكل ٢٠-١)، والتي منها يمكننا تخليق الإثنى عشرة الأخرى

من الأحماض الأمينية. ولو أنه يمكننا تخليق الدهون المشبعة من السكر، ولكن بعض الدهون الغير مشبعة لابد من أن يحتويها غذاء الإنسان. هذا وتكمل ثمانية أو أكثر من الفيتامينات قائمة إحتياجاتنا الغذائية (الشكل ٢٠-٢).

الشكل ٢٠-١. من العشرين حامض أميني المستخدمة في تخليق البروتينات، فالعشرة أحماض أمينية المذكورة لابد من وجودها بالغذاء، إذ لا يمكن تخليقها بالجسم من مواد زائدة أخرى. وكثير من البروتينات النباتية لا تحتوي على كميات كافية من الليسين Lysine والتربتوفان Tryptophan لمقابلة إحتياجات الانسان الغذائية.

الاحماض الامينية الضرورية	
أرجينين*	Arginine
هيستيدين*	Histidine
أيزوليوسين	Iso leucine
ليوسين	Leucine
ليسين	Lysine
ميثيونين	Methionin
فينيل ألانين	Phenylalanine
تريونين	Threonine
تربتوفان	Tryptophan
فالين	Valine

* للأطفال فقط

٢٠-٣. الهضم داخل الخلايا INTRACELLULAR DIGESTION

غالباً ماتتكسر أجزاء الطعام الصلبة إلى سائل يتكون نسبياً من جزيئات عضوية صغيرة، وقابلة للذوبان، قبل إمكانية إستخدامها بالكائنات الشاذة التغذية وتسمى تلك العملية بالهضم (Digestion). وفي بعض الكائنات شاذة التغذية، يحدث الهضم داخل الخلايا، أي، يحدث بعد أن تكون الأجزاء الصلبة قد تم احتواؤها (Engulfed) بالخلايا.

الشكل ٢٠-٢: بعض الفيتامينات الرئيسية.

الفيتامين	المرض المتسبب عن نقص الفيتامين	المصـــــدر	معلومات أخرى
م (A) ريتينيول (Retinol)	العمى الليلي	اللبن، الزبد، زيت كبد الحوت الجزر، وخضروات أخرى	رائد في تخليق الحبيبات الماصة للضوء في العين، يخزن في الكبد. سام في الجرعات الكبيرة
فيتامين (Thiamine) ب$_1$ (B$_1$)	البرى برى-تلف في القلب والاعصاب	الخميرة، البيض، الحبوب النجيلية الغير مبشورة	إنزيم مشترك في تنفس الخلايا
ريبوفلافين (ب$_2$ (Riboflavin -B$_2$)	التهاب اللسان-تلف في العيون - ضعف عـــام	الكبد، البيض، الجبن، اللبن،	مجموعة فعَّالة لأنزيمات الفلافوبروتين المستخدمة في تنفس الخلايا.
حمض النيكوتين Nicotinic acid نياسين (Niacin)	البلاجرا (تلف بالجلد، بطانة الامعاء، وربما الاعصاب)	اللحم، الخميرة، الزبد	يتحول الى نيوكوتينامين، وهو رائد من رواد ال NADP,NAD -انزيمان مشتركان في تفاعلات ال Redox في الخلية
حمض الفوليك (Folic acid-Folaciin)	الأنيميا	أوراق الخضروات الخضراء، يمكن تخليقه بالبكتريا المعوية	يستخدم في تخليق المرافقات الإنزيمية المشتركة في أيض الأحماض النووية

ب ١٢ (B_{12})	الأنيميا الحادة	الكبد	يمكن تخليقه بواسطة البكتريا في الامعاء
حمض الأسكوربيك (ج) Ascorbic acid (C)	الأسقربوط	ثمار الحمضيات، الطماطم، الفلفل الأخضر	مرافق إنزيمى مشترك في تخليق الكولاجين.
د (D)	الكساح الأيض الغير طبيعي للكالسيوم (Ca^{++}) والفوسفات $(PO_4^{\equiv})$ وينتج عنه نشوء غير طبيعي للعظام)	زيت كبد الاسماك، الزبد، الاغذية المحتوية على الستيرويدات التي ثم تشعيعها بالاشعة فوق البنفسيجية	يمكن تخليقه في جلد الانسان عند تعرضه للأشعة فوق البنفسجية
توكوفيرول (هـ) Tocopherol (E)	لا يوجد مرض معروف في الانسان نتيجة نقص هذا الفيتامين	مح البيض، السلاطة الخضراء، الزيوت النباتية	ربما يعمل كعامل إختزال في الجسم
ك (K)	التجلط البطيء للدم	السبانخ، الخضروات الورقية الأخرى، يمكن تخليقه بواسطة بكتيريا الأمعاء	هام لتخليق البروثرومبين، عامل أساسي في تجلط الدم

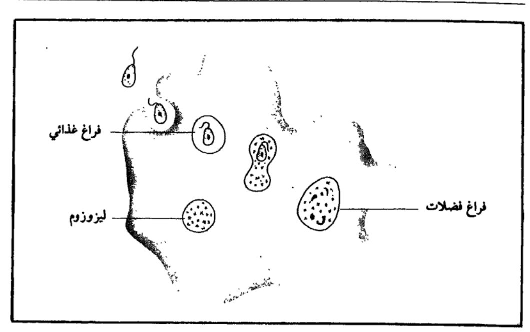
فتحتـوي الأميبا المواد الصلبة كالأوليات الأصغر منها بعملية إبتلاع المواد داخل البلازما (Endocytosis) (أنظر قسم ٦-٦)، توجد الفريسة داخل فراغ غذائي Food) (Vacuole موجود بداخل سيتوبلازم الأميبا، ويلي ذلك هضم الجزء الغذائي القابل للهضـم بانزيمات تفـرز داخل الفراغ بواسطـة ليزوسومات Lysosomes تندمج معه (الشكل ٢٠-٣)، ثم بعد ذلك تمر الجزيئات الغذائية من خلال غشاء الفراغ الغذائي إلى بقية الخلية. أما عن الأجزاء التي لم تهضم، فتخرج إلى الخارج. ولو أن الهضم في الأميبا يمكن وصفه بدقة كعملية هضم داخل خلوية، فلا بد من أن نضع في الحسبان الغشاء المحدد الموجود بين المادة في فراغها الغذائي وبقية السيتوبلازم.

و واضح أن عمليـة إبتلاع المواد داخـل الخلايا (Endocytosis) يمكن حدوثها إذا ما كانت المواد التي في متناول الكائن أصغر من الخلايا الأندوسيتية. ولا يوجد ما يدعو للدهشة، إذن، أن تعرف أن التغذية عن طريق ابتلاع المواد داخل الخلايا تكون قاصرة على الكائنات التي هيأت نفسها لضمان وجود المواد الغذائية الأصغر بكثير منها نفسها.

٢٠-٤. الهضم خارج الخلايا: EXTRACELLULAR DIGESTION

والحـل الثاني لمشكلة هضم الطعام هو إفراز أنزيمات هضمية من الخلايا وهضم الطعام خارج الخلية. وبمجرد هضم الطعام، يمكن للجزيئات الصغيرة الناتجة القابلة للذوبان (على سبيل المثال، السكريات، والأحماض الأمينية) أن تمر عن طريق خاصية الإنتشار أو عن طريق النقل النشط خلال غشاء الخلية ومنه إلى الخلية.

ولربما يكون أبسط إقتراب للهضم خارج الخلايا هو الذي تقوم به الكائنات الرمية (Saprophytes)، وهي التي تضمن غذاءها من الأشياء الغيرحية على شريطة أن تكون مواداً عضوية، مثل أجسام النباتـات والحيوانات الميتـة، والمنتجات الغذائية، ومواد الإخـراج، وغيرها، فغذاء فطر عفن الخبز العادي *(Rhizopus stolonifer)* يتبـع هذه المجموعة. وينمو هذا الفطر جيداً على قطعة خبز مبللة محفوظة في مكان مظلم (الشكل ٢٠-٤). والخبز، الذي ينتجه الإنسان من حبوب القمح الذي كان في يوم من الأيام نبـاتاً، يمـد الفطـر بجميع الاحتياجات الغذائية. فجزيئات النشا في الخبز كبيرة جداً، يصعب مرورها مباشرة خلال غشاء الخلايا. ولتحويل هذه الجزيئات الكبيرة والغـير قابلة للذوبان من جزيئات النشا إلى جزيئات صغيرة قابلة للذوبان ويمكنها



الشكل ٢٠-٣. الهضم داخل الخلايا في الأميبا. إنزيمات الهضم المخزنة داخل الليزوزومات تحلل جزيئا غذاء الفريسة مائيا الى جزيئات أصغر يمكن إمتصاصها خلال الغشاء الفراغي إلى السيتوبلازم.

الدخول في السيتوبلازم، لابد من وجود انزيم هاضم للنشا، ألا وهو الأميليز (Amylase). ويفرز الفطر هذا الانزيم في الخبز وبذلك يحدث الهضم خارج الخلايا، ثم تمتص بعد ذلك جزيئات السكر الناتجة في السيتوبلازم. وهذا النموذج من هضم الغذاء خارج الخلايا هو النظام النموذجي الموجود في جميع أنواع الفطريات والبكتيريا.

وأغلب الحيوانـات، كذلـك، تهضم غذاءهـا خارج الخـلايا، ومع ذلك، نادراً ماتعيش تلك الحيوانات في مكان حيث تكون فيها محاطة كلية بالمواد العضوية. وبدلاً من ذلك، فهي تضمن من طريق أو آخر المواد الغذائية والتي تظهر من وقت لآخر في المنـطقـة المحيطة بها. وتصنـع مثل تلك الحيوانات الغذاء في جيب أو أنبوبة داخل جسمها، وهي طريقة تعرف باسم البلع (Ingestion) ، ثم بعد ذلك تفرز إنزيماتها في هذه الأمكنة حيث يتم الهضم. وعلى ذلك فتوجد الانزيمات حيث يوجد الغذاء، بدلاً من إفرازها حراً في المنطقة المحيطة.

ولو أن البلع يوصف بأنه عبارة عن عملية أخذ مواد صلبة محتوية على الغذاء داخل الكائن إلا أن هذه المواد الصلبة تؤخذ فقط بوسيلة سطحية، فالتجويف أو الأنبوبة التي



الشكل ٢٠-٤. فطر شائع *(Rhizopus stolonifer)* نامي على قطعة خبز، ويؤمن هذا الفطر غذاءة بافراز إنزيمات هاضمة على الخبز ثم يقوم بامتصاص نواتج الهضم

تستقبل المواد الغذائية الصلبة هي في الحقيقة جزء من خارج الكائن وإنبعج للداخل (الشكل ٢٠-٥). فإذا ما ابتلع طفل قطعة رخام لن تدخل مطلقا أي خلية أو حتى لن تشارك في أي نشاط خاص بالتمثيل الغذائي. وبعد يوم أواثنين فإن قطعة الرخام هذه تخرج من الناحية الاخرى بدون أي تغيير.

٢٠-٥. التغذية بالترشيح : بلح البحر
A FILTER FEEDER : THE CLAM

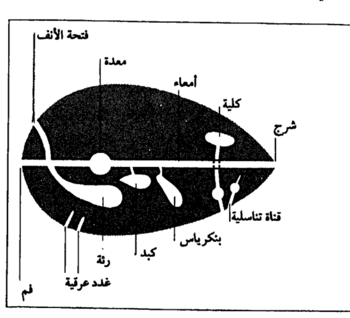
تتغذى بعض حيوانات المياه العذبة والكثير من الحيوانات البحرية عن طريق أخذها تياراً من الماء وترشح منه أي كائنات صغيرة قد تكون موجودة به ثم تبتلع تلك الكائنات في جهازها الهضمي لهضمها وامتصاصها. فالبارناكل (Barnacle) وقنفذ البحر مثالان من أمثلة الحيوانات التي تتغذى عن طريق عملية الترشيح. في حالة قنفذ البحر، تزود أسطح الخياشيم بأهداب (Cilia)، والضرب المنتظم لتلك الأهداب يسحب المياه العذبة إلى داخل فتحة سيفون التيار الداخل (الشكل ٢٠-٦)، ثم تمر المياه بعد ذلك خلال مساحات في الخياشيم حيث تزود بالأكسجين لسد الاحتياجات التنفسية للقنفذ. وتتغطى الخياشيم بطبقة سميكة من المخاط، أي

مادة صلبـة في الماء، بما فيها الدياتومات، والبكتيريا، وغيرها، يتم حجزها في تلك المـادة المخـاطية. وتسقط المـواد الصلبـة الأكبر وكذلك المواد الغير قابلة للهضم من الخياشيم ويكتسحها سيفون التيار الخارج بواسطة أهداب مبطنة للقلنسوة (Mantle). ويتجه المخاط بحمله من المواد المنتقاة بعناية إلى ا لأمام للذهاب إلى الفم بينما يمر الماء المرشح للخارج خلال سيفون التيار الخارج، ثم يتم بعد ذلك إبتلاع المخاط المحمل بالجزيئات. وبعد الهضم، تطرد أية مواد باقية (البراز) من فتحة الشرج وتمر إلى الخارج مع تيار الماء عن طريق سيفون تيار الماء الخارج.

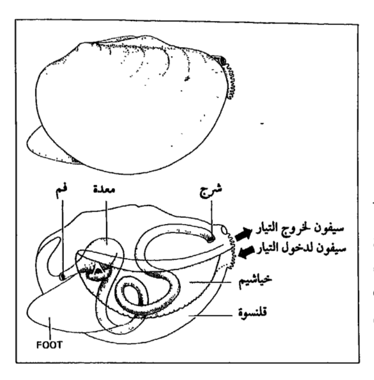
٢٠-٦. النشيطون في البحث عن الغذاء: النطاط ونحلة العسل

ACTIVE FOOD SEEKERS: THE GRASSHOPPER AND THE HONEYBEE

إن أغلب الحشرات وأغلب الفقاريات قادرة على سرعة الحركة وبالتالي تكون قادرة على البحث عن غذائهـا بنشاط. فالنطاط يتحرك من نبات إلى نبات بالمشي والقفز والطيران، كي تمكنه زوائد متخصصة حول فمه من إستهلاك كميات كبيرة من أوراق النبات بسرعة وبكفاءة (الشكل ٢٠-٧). وتمر المادة النباتية من الفم إلى القناة الهضمية للهضم والامتصـاص، فتمر أولاً خلال المريء ثم إلى مخزن مؤقت يسمى الحوصلة (الشكل ٢٠-٧)، ومن الحوصلة ينتقل إلى القونصة العضلية المبطنة بصفائح مجعدة وتؤدي حركة العضلات الذاتية لتلك القونصة إلى طحن المادة الغذائية إلى جزيئات



الشكـل ٢٠-٥. منـظر تخطيطي للعلاقات المكانية الأسـاسيـة في حيـوان ثديـي. قنـوات الـغـدد الهضميةمستمرة مع سطح الجسم.

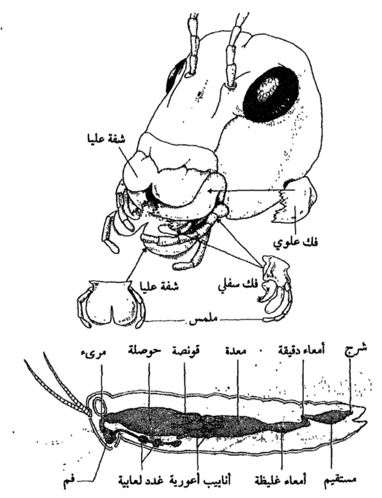


الشكــل ٢٠-٦. الجهــاز الهـضـمي في بلح البحــر. ترشـح الأجسـام الغـذائيـة بواسـطة الخيـاشيم من الماء المسحــوب للداخـل خلال السيفـون الـذي يدخل عن طريق الماء.

أصغر. ثم يمر الغذاء بعد ذلك إلى المعدة، حيث يتم الهضم، وتفرز إنزيمات الهضم المصنعـة داخـل ستـة أنـابيب أعورية غدية (Caeca) إلى داخل المعدة للقيام بتلك الوظيفة (الهضم)، وقد يدخل بعض الغذاء إلى داخل تلك الانابيب الأعورية أثناء هذه العملية، ثم يمتص الغذاء المهضوم وكمية كبيرة من الماء في الأمعاء، ويخزن البراز مؤقتاً في المستقيم قبل إخراجه، جافاً نسبياً، عن طريق فتحة الشرج.

وتختلف أجزاء فم شغالة نحلة العسل كلية في المظهر، وهي محورة للتعامل مع نوع مختلف من الغذاء، إذ تتغذى نحلة العسل والبالغة على غذاء سائل، وهو إمَّا رحيق الأزهار أو عسل النحل المخزن في الخلية وتتحور الفكوك السفلي والشفة السفلي لتأخذ شـكل أنبوبـة يسحب بواسطتهـا الغذاء لأعلـى إلى الفـم بعمليـة الشفط (Pumping) الذي يقـوم به اللسـان . ويطلـق على الجهـاز كلـه اسم الخـرطـوم (Proboscis) (الشكل ٢٠-٨).

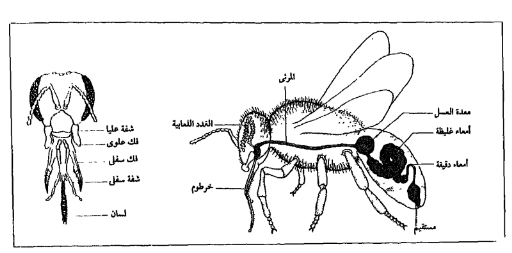
ويكون نصيب أغلب الرحيق الممتص بواسطة شغالة نحلة العسل هو أخذه إلى الخلية كي يتحول إلى عسل، إذ بعد أن يمر الرحيق إلى أسفل داخل المريء الطويل، يخزن في معدة العسل (الشكل ٢٠-٨). ويمنع الرحيق بطبيعة الحال من المرور من



الشكـل ٢٠-٧. أجهـزة تجهيز الطعام في النطاط. أجزاء الفم والقونصة تسبب طحن الطعام. الأنابيب الأعورية والمعدة تقوم بالتكسير الكيميائي، أي الهضم.

معدة العسل إلى المعدة الحقيقية بواسطة صمام موجود بين المعدتين. وعند عودة الشغالة إلى الخلية، فإنها تتقيأ الـرحيق في العيون السداسية لأقراص الشمع الموجودة داخل الخلية، وهنا تبدأ عملية تحول الرحيق إلى عسل.

وتستخدم شغالة نحلة العسل فمها للتعامل مع المواد الصلبة كذلك مثل الشمع الـذي تصنـع منـه الشغالة أقراص الشمع بالخلية، فتستخدم فكوكها العلوية لهذه العملية ولذلك ليس من المستغرب أن تكون الفكوك العلوية، لأجزاء فم شغالة نحلة العسل تشبه مثيلاتها في النطاط من حيث تركيبها.



الشكـل ٢٠-٨. أعضـاء تناول الغذاء في نحلة.العسل. الفكوك السفلي والشفة السفلى تكون خرطوما يمتص به النحل الغذاء السائل على هيئة رحيق. تحتفظ معدة العسل بهذا الغذاء إلى أن يحين نقلة إلى الخلايا.

الجهاز الهضمي في الانسان : THE HUMAN DIGESTIVE SYSTEM

٢٠-٧. البلع INGESTION

إن الاستراتيجية التي يهضم بها الانسان غذاءه تشبه مثيلتها في النطاط، إذ بمجرد وضع الغذاء بداخل الفم، يطحن الغذاء إلى قطع صغيرة باستخدام الأسنان. وكما في النطاط، يتبع التكسير الميكانيكي للغذاء التكسير الكيميائي (أي الهضم)، وهذا هام حيث يجعل الغذاء أكثر سهولة في البلع وفي نفس الوقت يزيد من المساحة السطحية التي تتعرض لفعل الأنزيمات الهضمية.

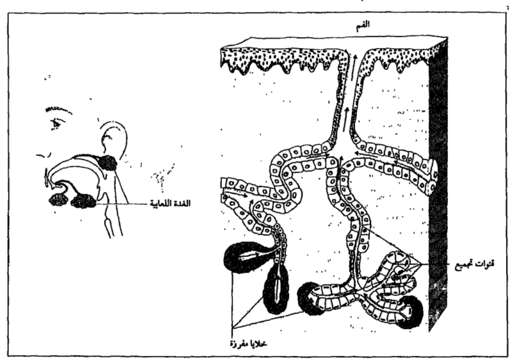
وبينما يكون الغذاء موجوداً بالفم، يتم ترطيبه باللعاب الذي يفرز في الفم بواسطة ثلاثة أزواج من الغـدد (الشكل ٢٠-٩) ، الموضوعـة تحت تحكم الجهـاز العصبي . ورؤية ، وشم ، وتذوق ، وحتى التفكير في الغذاء ، كلها تنبـه خروج اللعاب من الغدد عن طريق قنوات خاصـة إلى الفم . واللعاب سائل متماسك و لزج نسبياً إذ أنه يحتـوي على جزيئـات كربـوهيدراتية - بروتينيـة تسمى الميوسينـات (Mucins) تمكن اللعاب من ربط أجزاء الطعام الصغيرة ببعضها البعض لتكون كتلة لينة يمكن بلعها بعد ذلك بسهولة.

يحتوي اللعاب كذلك على إنزيم الأميليز Amylase ، وهو الانزيم ا لذي يهضم

النشا، والذي يحول النشا إلى سكر المالتوز. وغالباً ما يطلق على الأميليز إسم بتيالين "Ptyalin" ، ولـو أنه طبقاً للقواعد المتبعة في تسمية الانزيهات يفضل استخدام إسم الأميليز. ويمكنك تجربة فعل إنزيم الأميليز بسهولة بمضع قطعة خبز غير محلاة، وبعد وقت قصير، يمكنك ملاحظة أن طعمها أصبح حلواً.

واللعاب هو فقط أول العديد من الافرازات التي تصب في القناة الهضمية وتساعد على الهضم . وفي كل حالة، يتم تخليق هذه الانزيهات في تراكيب خاصة تسمى الغدد، وتحمل قنوات هذه الافرازات من الغدد إلى القناة الهضمية ويكون السطح الداخلي لكل غدة مستمراً مع السطح الداخلي للقناة الهضمية. وفي الحقيقة، فإن كل تلك الغدد الهضمية تتكون أثناء النشوء الجنيني من إنبعاجات خارجية للقناة الهضمية.

وعند إبتلاع الغذاء، يمر في البلعوم ثم المريء، والمريء أنبوبة مستقيمة ذات جدار سميك، وعضـلي، ويصل بين البلعوم والمعدة، ويمتد المريء خلال الرقبة والفراغ الصدري، ويمكن تفهم وظيفته بصورة أفضل بأنها وسيلة سريعة لنقل الغذاء خلال



الشكل ٢٠-٩. نظام الغدد اللعابية في الانسان. وكما في جميع الغدد المفرزة، يمر إفراز تلك الغدد في جهاز من القنوات التي تؤدى بالتالي إلى خارج الجسم.

أعضاء الفراغ الصدري الكبيرة والحيوية والغير مهضمة: الرئتين والقلب.

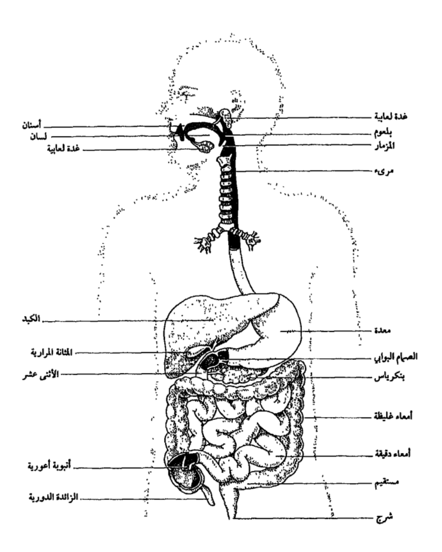
ويحتـوي جدار المـريء كذلـك على غدد تفرز الميوسين وبذلك يتم تزييت الممر الغـذائي، وبمجـرد وجود الكتلة الغذائية بداخل المريء، فإن حركتها تتوقف على العضـلات المـوجـودة بجدار المريء والتي لا تخضع لتحكمنا الإرادي. فالعضلات الموجودة أمام كتلة الغذاء تنبسط بينها تلك الموجودة خلف كتلة الغذاء تنقبض، ونتيجة لذلـك، تدفـع الكتلة الغـذائية إلى أسفـل، وتسمى هذه الموجات الذاتية لانفراج وانقباض العضلات باسم "Peristalsis".

وأسفل الحاجز العضلي، الذي يفصل فراغ الصدر عن فراغ البطن، يتصل المريء بالمعدة، وتحيط حلقة من العضلات، هي الصمام البوابي، بالمريء عند هذه النقطة، وتستخـدم كصـمام ينبسط ليسمح بمرور الغذاء إلى المعدة بمجرد إقترابه من أعلى، ويظل مقفولا دائماً في غير تلك الأوقات (وتتطلب عملية القيء بطبيعة الحال، فتح الصمام البوابي).

٢٠-٨. المعـــدة THE STOMACH

المعدة عبارة عن جيب كبير بأعلى فراغ البطن (الشكل ٢٠-١٠)، ويبطن جدارها من الـداخـل بملايين من الغدد المعدية الصغيرة، والتي تفرز مجتمعة ٤٠٠ - ٨٠٠ ملليلتر من العصير المعدي في كل وجبة، ويختلط الطعام الداخل جيداً بالعصير المعدي عن طريق إنقباضات عضلية شديدة للمعدة.

و توجد ثلاثة أنواع من الخلايا في الغدد المعدية: خلايا جدارية Parietal ، وخلايا رئيسية (Chief) والخلايا المفرزة للمخاط. وتفرز الخلايا الجدارية حمض الهيدروكلوريك في المعدة، ويساوي تركيز هذا الحمض (M ٠,١٥) جاعلاً تركيز أيون الهيدروجين في العصير المعدي قريباً من (١). فإذا ما علمت أن تركيز أيون الهيدروجين في الدم الذي يغـذي الخلايـا الجدارية. يعادل فقط (٤ × ١٠^-٨ M) يمكنك تصور العمل الفذ الذي تقوم به هذه الخلايا. وبالنقـل النشـط تحصل تلك الخلايا على أيونات كافية من الهيدروجـين لإنتـاج تركيز أكثر من ٣ ملايين مرة لهذه القيمة. ومن المدهش حقاً، عندئذ، أن الخلايا الجدارية هي مستهلك كبير للطاقة وممتلئة على الخصوص بالميتوكوندريا.



وللحامض الهيدروكلوريك في العصير المعدي عدة وظائف نافعة: (١) فهو يساعد على قتل البكتيريا الموجودة في الغذاء الداخل للمعدة، (٢) يساعد على تغيير طبيعة البروتين بتكسير النسيج الضام، وغير ذلك لتسهيل عملية الهضم، (٣) يساعد على تنشيط الببسين، وهو إنزيم الهضم الوحيد الذي تفرزه المعدة.

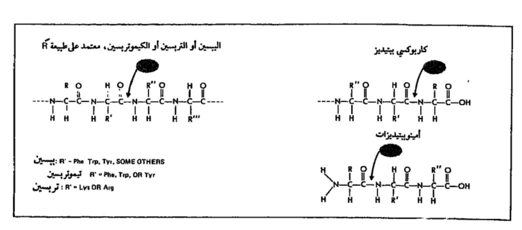
وتعمـل الخـلايا الـرئيسيـة على تخليق وافـراز الببسينـوجـين، وهو باديء إنزيم الببسين، وبمجرد التعرض لدرجة التركيز الحامض (pH) للعصير المعدي، يتم هضم كسرة من جزيئـاته، تاركاً الانزيم الفعّال. ولا يحلل الببسين تحليلاً مائياً البروتينات الموجودة بالغذاء فقط، ولكنه أيضا يحلل الببسينوجين الزائد، وهو مما يسرع من تحول الببسينوجين إلى ببسين.

ويظهر الببسين التميوئي عند مواقع معينة من حلقات عديد الببتيد، كما أنه فعّال جيد في إنقسام روابط الببتيدات على النهايات الكربوكسيلية للأحماض الأمينية أمثال التيروسين، الفينايل ألانين، التربتوفان (الشكل ٢٠-١١). وكنتيجة لفعله، فالسلاسل الطويلة لعديد البيبتيد تتكسر إلى أطوال أقصر.

ويتكون جدار المعدة في غالبيته من البروتين، فلماذا إذن لا تهضم المعدة نفسها؟ السبب هو عامل واحد، وهو طلاء للحماية ويتكون من الخلايا المفرزة للمخاط في المعدة. علاوة على ذلك، تتصل خلايا المعدة الطلائية ببعضها البعض باتصالات متينة (انظر قسم ٥-٢٤)، بذلك تمنع دخول أي زيادة من العصير المعدي إلى داخل أسطحها الغير محمية. ويعرقل إفراز الببسين على هيئة البادىء اللببسينوجين نشاط الهضم البروتيني (Proteolytic) لحين وجود الانزيم آمنا في فراغ المعدة (قناة المعدة). وبالرغم من وجود وسائل الحماية هذه، فإنه يحدث فقد كبير في الخلايا الطلائية، إذ لا يزيد طول عمرها عن عدة أيام، ويتطلب هذا مستوي سريع لإحلال الخلايا. وبطبيعة الحال، قد تفشل وسائل الحماية هذه في بعض الأحيان والنتيجة هو قرحة المعدة، وهو تلف موضعي لبطانة المعدة.

واكتشف العالم الروسي الفسيولوجي الشهير إيفان بافلوف (Ivan Pavlov) عام ١٨٩٠ م ميكانيكية التحكم في إفراز العصير المعدى، إذ وجد أنه بعد قطعة للأعصاب المؤدية إلى معدة الكلاب، قلت كمية الافراز المعوي بنحو ٢٥٪، ويدل هذا دلالة قاطعة، ولكن غير كاملة، إن الجهاز العصبي يتحكم في الافراز المعدي. فماذا إذن عن الـ ٧٥٪ الباقية؟ عزى بافلوف ذلك إلى إفراز هرمون في الدم بمجرد دخول الغذاء إلى المعدة، والذي ينبه المعدة أيضاً لافراز العصير المعدي. واختبر بافلوف هذه النظرية بايصال الجهازين الدوريين لكلا الكلبين، فعند تغذية أحد الكلبين، يمضي فقط وقت قصير قبل أن يبدأ الكلب الآخر في إفراز العصير المعدي أيضاً، كما أفرز الكلب الثاني، على آية حال، ٧٥٪ فقط من الكمية العادية. والآن نحن نعرف أن الهرمون جاسترين (Gastrin) يفرز بواسطة خلايا خاصة في المعدة عند دخول الغذاء إلى تلك المعدة.

وهذه الخلايا المفرزة للجاسترين يتم تنبيهها على الخصوص بوجود الببتيدات (ومن مثل تلك المواد الكافيين والايثانول). والهرمون جاسترين هو عديد الببتيدات ويحتوي على ١٧ حمض أميني، يدخل إلى مجرى الدم ويحمل إلى باقي أجزاء الجسم. وعند



الشكل ٢٠-١١. الفعل المائي للبروتييزات المختلفة.

رجوع الدم المحتوي على هذا الجاسترين إلى المعدة فإنه ينبه الخلايا الجدارية لافراز حمض الهيدروكلوريك. وفي تجربـة بافلوف، يمر هرمون الجاسترين إلى مجرى الدم للكلب الثاني، منبها الخلايا الجدارية به أيضا.

ويحـدث القليل من إمتصاص المواد في المعدة، فبعض الماء، وقليل من الأيونات وعقارات مثل الأسبرين والايثانول، يتم إمتصاصها في الدم (وتساعد بذلك للظهور السريع للايثانول في الدم بعد تناول شراب).

وتتحول محتويات المعدة إلى مادة سائلة تمر خلال الصمام الموجود عند الطرف الأسفل ثم إلى الأمعاء، والتي تسمى العشر بوصات الأولى منها بالاثنى عشر (Duodenum)، تؤدي فتحـة جدار الاثنى عشر إلى قنـاتـين واللتـين، بدورهما، تصب فيهما غدتان هضميتان كبيرتان هما البنكرياس والكبد.

٢٠-٩ البنكـرياس THE PANCREAS

البنكـرياس عضو مستطيل، أبيض، غدى، يقع في العروة (Loop) التي تكونها الأثنى عشر مع السطح السفلي للمعدة. وتفرز الخلايا الافرازية في البنكرياس السائل البنكرياسي الذي يمر بعدئذٍ في القناة البنكرياسية ثم إلى الاثنى عشر، ويحتوي السائل البنكرياسي على المواد التالية:

(أ) بيكربونات الصوديوم (ص يد ك أ$_3$) وتعمل على تعادل حموضة محتويات الأمعاء وذلك بالرفع السريع لدرجة الحموضة (pH) إلى نحو ٨.

(ب) إنزيم الأميليز، ويعمل على التحليل المائي للنشا ويحولها إلى مزيج من المالتوز والجلوكوز، لأن مفعولية هذا الانزيم تطول لمدة طويلة، فهو يلعب دوراً أهم في هضم النشا أكثر من أميليز اللعاب.

(ج) إنزيم الليبيز (Lipase) ويعمل على التحلل المائي للدهون التي يتناولها الانسان ويحولها إلى مزيج من الأحماض الدهنية والجليسيريدات الأحادية، ويحدث ذلك بتنشيط الفصل الكيميائي للأحماض الدهنية الملتصقة بذرات الكربون ارقام ١ ، ٣ للجليسرول. أما عن الأحماض الدهنية الملتصقة بالكربون رقم ٢ فتبقى لانتاج الجليسيريد الأحادي.

ويسرع عمل إنزيم الليبيز كثيراً وجود الصفراء (Bile) التي تحتوي على أملاح الصفراء، وهي استيرويدات مزدوجة المحبة للماء والتي تلعب دوراً هاماً في تحويل الدهون المأكولة إلى مستحلب. ويذوب الهيكل الكاره للماء للأستيرويد في الدهون بينما تكون حلقة الجانب السالبة الشحنة حرة في التفاعل مع جزيئات المياه القطبية، والازاحة المتبادلة للنقط السالبة الشحنة تمنعها من الالتحام (أنظر الشكل ٢٠-٦). وعلى هذا فإن كرات كبيرة من الدهون (سائلة تحت درجة حرارة الجسم العادية) تصير مستحلبة في نقاط صغيرة (نحو ١ ميكرون في القطر) كي يمكن هضمها بسهولة أكبر ثم إمتصاصها.

(د) إثنان من إنزيمات البروتييز وهما : التربسين (Trypsin) والكيموتربسين (chymot-rypsin) ، ويستمر عمل هذين الانزيمين في هضم البروتين كما يهاجم الكيموتربسين نفس الروابط الببتيدية التي يهاجمها البيسين (يتوقف عمل البيسين عند ارتفاع درجة حموضة محتويات الامعاء (pH) بواسطة بيكربونات الصوديوم). ويهاجم التربسين حلقات الببتيد عند النهايات الكربونية في وحدات الأرجنين والليسين (الشكل ٢٠-١١). وكما في البيسين، فإن التربسين والكيموتربسين يتم إفرازهما في صورة غير نشطة وفقط عندما يكونان في الاثنى عشر يتحولان إلى الحالة النشطة.

(هـ) إنـزيم الكاربوكس ببتيديز (Carboxypeptidase) وهـو يبعـد الأحماض الأمينية الموجودة على النهاية الكربونية في الجزيئات الببتيدية واحداً تلو الآخر (الشكل ٢٠-١١)، على ذلك، فهو يساعد في التحلل المائي للببتيدات إلى أحماض أمينية.

(و) إنـزيم النيوكلييز (Nuclease) والـذي يعمل على التحلل المائي للاحماض النووية التي تم دخولها بالجسم (DNA , RNA) إلى النيوكليوتيدات المكونة لها (Nucleotides).

ويخضـع إفـراز السـائـل البنكـرياسي لضـوابط هرمونية، فعند دخول المحتويات الحمضية للمعدة إلى الاثنى عشر، فإن بعض الخلايا الموجودة في جدار الاثنى عشر تفرز هرموني السكرتين (Secretin) والكولي سيستوكينين (CCK - Cholecystokinin) في مجرى الدم. وعند ذهابهما إلى البنكرياس، فإن هذين الهرمونين ينبهان إنتاج وإفراز السائل البنكرياسي. ويؤثر إفراز السائل البنكرياسي أساساً على إفراز محلول بيكربونات الصوديوم، بينما ينبه الـ (CCK) إنتاج إنزيمات الهضم.

وفـي وقت من الأوقـات، كان يستخـدم إسم البنكـريوزيمين (Pancrozymin) للانـزيم الثـاني من الانـزيمـين السـابقين، ولكن فيما بعد أصبح واضحاً أن رجال الأبحاث الذين يقومون بدراسة هرمون يسمى كولي سيستوكينين، الذي يعمل على كيس المرارة (قسم ٢٠-١١)، وكذلك هؤلاء الذين يقومون بدراسة البنكريوزيمين كانوا في حقيقة الأمر يقومون بدراسة نفس المادة: عديدة الببتيدات التي تحتوي على ٣٣ حمض أميني. وكما يقوم الرجل الأعمى بوصف فيل بتحسسة للطرفين المتضادين له، فكـذلـك فرق البحّاث المختلفين بأهداف وطرق عمل مختلفة ودائماً ما ينتهوا بأنهم يقومون بدراسة نفس الشيء. فالاسم كولي سيستوكينين إستخدم أولاً وبقى كذلك.

٢٠-١٠ . الأمعاء الدقيقة : THE SMALL INTESTINE

وبمـرور خليط الغـذاء والمـرارة وانزيمات البنكرياس خلال الأمعاء الدقيقة تنتج السكريات الثنائية والببتيـدات والأحماض الدهنيـة والمونوجلسيريدات. والهضم النهائي والأمتصـاص لتلك المـواد هما من وظـائـف الخـمائـل (Villi) المبطنة للسطح الداخلي للأمعاء الدقيقة (الشكل ٢٠-١٢). وتزيد الخمائل المساحة السطحية للامعاء الدقيقة لعـدة مرات وكـأنها ببساطة أنبوبة ذات جدر ملساء. وعلاوة على ذلك فإن السطح المعرض للخلايا الطلائية بكل خميلة مغطى بنتوءات أو خمائل أصغر (The Microvilli) أو أهـداب مكـونـة من زوائـد بروتـوبلازميـة يطلق عليها (Brushborder) (الشكل



الشكـل ٢٠-١٢. الخمـائـل تفـرش السـطح الداخلي للأمعاء الدقيقة كما ترى بالميكروسكوب الالكتروني المسّاح . (بتصريح من كيث ر. بورتر).

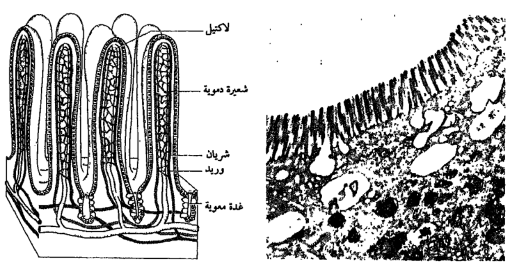
٢٠-١٣). والفضـل كله لهذه الخمائل الدقيقـة ، إذ تصبح مساحـة السطح الكلي للأمعـاء الدقيقة نحو ٢٠٠ متر مربع ، وهو يعادل حجم ملعب التنس ونحو ١٠٠ من مساحة سطح الجسم من الخارج ويضم سطح الخمائل الدقيقة عدداً من الانزيمات التي تكمـل عملية الهضـم ، فالعـديد من إنزيمات الأمينوببتيديز (Aminopeptidases) تكمـل التحلل المائي للببتيـدات وتحولها إلى أحمـاض أمينية ، وتعمل الانزيمـات المذكـورة بطريقـة مشابهـة لانزيـم الكاربوكس ببتيديـز (Carboxypeptidase) ولكنها تهاجـم نهاية الأمينـو (NH_2 -Terminal) في جزيئات الببتيد بدلاً من النهاية الكربونية (شكل ٢٠-١١).

وتوجد ثلاثة إنزيمات لثنائيات التسكر (Disaccaridases) مركزة على أو في الخمائل الـدقيقـة وهي تحلل مائياً السكـريات الثنـائية مثل المالتوز والسكروز واللاكتوز إلى مكـونـاتهـا الأحادية. وينفصل كل جزيء مالتوز إلى جزيئين جلوكوز و بهذا يكون الجلوكـوز هو النـاتج النهائي لهضم النشا. ويعطي السكروز (سكر المائدة العادي) جزيء جلوكوز وأحد مشابهاته الفركتوز ، بينما يعطي اللاكتوز (سكر اللبن) جلوكوز وجالاكتوز (الشكل ٤-٩).

وبفعـل هذه الانـزيمات، يأتي هضم البروتين والكربوهيدراتات إلى النهاية، التي كانت من قبل جزيئات كبيرة أصلاً تحولت الآن إلى جزئيات صغيرة (أحماض أمينية وسكريات أحادية). وجاهزة للمرور في مجرى الدم.

وكل خميلة تزود بكثرة بالدم الذي يمر عبر شبكة من الأنابيب الدقيقة التي يطلق عليها إسم شعيرات دموية (Capillaries) ، تمر السكريات والأحماض الأمينية وكذلك الفيتامينات والأملاح والماء من محتويات الأمعاء الدقيقة إلى تلك الشعيرات الدموية بالخمائل. وربما يحدث هذا الانتقال عن طريق الانتشار في بعض الحالات، ولكن قد تتدخل عوامل ميكانيكية أخرى أيضاً. فالجلوكوز، على سبيل المثال، يستمر في أن يمتص حتى ولو أصبح تركيزه في سائل الأمعاء الدقيقة أقل من تركيزه في الدم (نحو ١ , ٠٪) ، ويتم هذا الامتصـاص بالنقـل النشـــط ، وقد تدخل بعض المواد خلايا الخمائـل بواسطـة خاصيــة إبتلاع المـواد داخل البلازمـا (Endocytosis).

وبمجـرد وجـودهـا داخل خلايا الخمائل، فإن الأحماض الدهنية والجليسيريدات الأحادية الممتصـة يتم تخليقها إلى دهون، ويحدث هذا في الشبكة الإندوبلازمية الملساء في تلك الخلايا. وتطرد الحبيبات الصغيرة الدهنية عن طريق خاصيـة طرد المواد خارج



الشكل ٢٠-١٣. الخمائل يسار: دهون ممتصة تدخل اللاكتيلات، المواد الممتصة الأخرى تدخل الشعيرات الدموية. يمين: صورة الكترونية (٩٠٠٠) للخمائل الدقيقة في خلية أمعاء فأر. (بتصريح من دكتـور ل. كلارك-الصغير. طبعت بتصريح من مطبعة معهد روكفلر، المجلة الفسيولوجية الحيوية والكيمياء الحيوية لعلم الخلية، ٥: ٤١-٥٠، ١٩٥٩).

البــلازمــا (Excytosis) إلى داخـل الخـمائـل . ولا تدخـل تلـك الحبيبـات شبكـــة الشعيـرات الدموية، إذ بدلاً من ذلك فهي تدخل القناة اللبنيـة (Lacteal) ، حيث أن جدرها أكثر مسامية، والقنوات اللبنية للخمائل هي جزء من الجهاز اللميفاوي . وسيتم شرح مورفـولـوجية وفسيولـوجية هذا الجهاز الليمفاوي في الباب الرابع والعشرين. وبمجرد وجودها داخل القنوات اللبنية فإن الحبيبات الدهنية تحمل ببطء خلال الجهاز الليمفاوي إلى أن تصل إلى الجهاز الدوري الدموي المعتاد. وبعد وجبه غنية بالدهن، تأخذ تلك القنوات اللبنية شكلاً أبيض لبني المظهر (لاك – Lac هي الكلمة اللاتينية للبن) وذلك بسبب العدد الكبير من الحبيبات الدهنية الموجودة بداخلها.

٢٠-١١. الكبـــد THE LIVER

ولو أن الكبد ليس من أعضاء الهضم بمعنى الكلمة، فإن إفرازه، أى الصفراء bile ، يلعب دوراً هاماً في هضم الدهون. وتنتج الصفراء باستمرار بواسطة الكبد، ولكن بين الوجبات تجتمع الصفراء في عضو تخزين، هو كيس المرارة. وعند دخول الغذاء الأثنى عشر، فإن إفـراز الكولي سيستوكينين ينبه إنقباض كيس المرارة وبذلك تخرج محتوياتها المتجمعة من الصفراء إلى الاثنى عشر.

وأفعـال الـ (CCK) الجـاسـترين والسكـرتـين، توضـح حقيقة هامة عن التحكم الهـرمـوني. ففي كل حالة، يحمل الهرمون المفرز بواسطة الدم إلى كل جهاز، وكل نسيج ، وكل خلية من خلايا الجسم. وتوجد فقط بعض الأجهزة، على أية حال، قادرة على الاستجابة لوجـود الهرمون ، وتسمى مثل تلـك الاجهزة بأجهزة الهدف Target). Organs)

وتحتوي الصفراء على مواد أخرى بجانب أملاح الصفراء، ومن تلك المواد حبيبات الصفـراء وهي من نواتج تكسير حبيبات الدم الحمراء، والهيموجلوبين والتي يبعدها الكبد من خلايا الدم الحمراء القديمة، واللون البني لحبيبات الصفراء هو السبب في لون البراز البني.

وتكوين الصفراء هو واحد فقط من العديد من الوظائف الغذائية الهامة التي يقوم بها الكبد. وقبل وصول الدم الذي يترك الخمائل إلى الدورة الدموية العامة، فهو يمر

في الكبد، وهنا تغربل المكونات الغير عادية (مثل الجزيئات الغير غذائية) التي إلتقطت عن طريق الامتصاص من الأمعاء الدقيقة أو أية كميات زائدة من المكونات العادية. فجميع السكريات الأحادية، فيما عدا الجلوكوز (مثل الفركتوز والجالاكتوز) تبعدها الكبد وتحولها إلى جلوكوز وإذا كان الجلوكوز موجوداً في الدم بنسبة زائدة عن المعتاد وهو تركيز ١ , ٠٪ فإن أغلب هذه الزيادة تبعد وتتحول إلى جليكوجين وهو من عديدات السكريات الغير ذائبة.

والأحماض الأمينية الزائدة عن الإحتياجات البنائية للجسم تبعدها الكبد أيضاً، وفي تلك العملية، فإن جزء الأمين المحتوي على النتروجين (NH_2-) تبعده الكبد، فيما بعد يتحول هذا الجزء إلى فضلات نيتروجينية، هي اليوريا، وسيتم شرح ميكانيكية تلك العملية في الباب الخامس والعشرين. ويمكن لبقايا الحمض الأميني الخالي من النيتروجين بعد ذلك دخول ممر الأيض للتنفس الخلوي والتأكسد للحصول على الطاقة، وتمت دراسة تفاصيل هذه الميكانيكية في الباب السابع.

ونظام الأوعية الدموية التي تحمل كل الدم الآتي من الأمعاء عن طريق الكبد قبل مروره إلى الدورة الدموية العامة يطلق عليه الجهاز البابي الكبدي (Hepatic portal sys-tem) وبمعنى حقيقي، يعمل هذا الجهاز كحارس البوابة بين الامعاء وبين الدورة الدموية العامة. وفي هذا الدور، تنقى الكبد الدم المار بها حتى يكون تركيب الدم بعد تركه الكبد هو التركيب الطبيعي للكائن. وعلى سبيل المثال، وحتى بعد وجبة غنية بالمواد النشوية والسكرية، فإن مستوى الجلوكوز في الدم الخارج من الكبد لا يكون أعلى بكثير عن المستوى العادي وهو ١ , ٠٪. ومن جهة أخرى، إذا بدأ تركيز الجلوكوز في الدم في النزول بين الوجبات، فإن الكبد تقوم بتحليل كمية كافية من مخزون الجليكوجين الموجود بها للابقاء على المستوي ١ , ٠٪ . وبعبارة أخرى، فإن الكبد تعتبر من أهم الوسائل في جسم الإنسان التي تحافظ على ثبات السائل الخلوي الزائد (ECF) وبالتالي الحفاظ على مكونات وخواص هذا السائل الخلوي الزائد المذكور. وفي الباب السابع والعشرين، سيتم شرح دور الكبد في الحفاظ على مكونات وخواص هذا السائل الخلوي الزائد وخاصة محتوياته السكرية.

٢٠-١٢ . الأمعاء الغليظة THE LARGE INTESTINE

تؤدي الأمعاء الدقيقة إلى الأمعاء الغليظة ، ويوجد صمام يتحكم في مرور المواد من مكان إلى آخر، ويوجد خلف هذا الصمام مباشرة جيب منفصل هو الأعور (Caecum) ، ويتصل بالأعور هذا بروز صغير، هو الزائدة الدودية أو المصران الأعور (Appendix) والتي تعتبر البقايا الاثرية لتركيب ربما كانت وظيفته هضم السليلوز في بعض الأجداد الأوائل للإنسان. وتهمنا الزائدة الدودية في إحتمال إصابتها بالعدوى فتسبب إلتهاب الزائدة الدودية appendicitis. وقد تسبب العدوى الشديدة في تمزق الزائدة الدودية فتنتشر العدوى إلى الأغشية المبطنة لتجويف البطن والمدعمة للأعضاء (الأحشاء viscera) الموجودة بداخله . وتعرف هذه الحالة بإصابة الغشاء البريتوني (Peritonitis).

وتتلقى الأمعاء الغليظة بقايا سائل المواد التي تركب بعد انتهاء عمليات الهضم والامتصاص في الأمعاء الدقيقة ، وتحتوي هذه البقايا على كميات كبيرة من الماء وكذلك على المواد التي لم تهضم (وخاصة السليلوز) ويعمل السليلوز وبعض بقايا المواد الغذائية الأخرى على تغذية التعداد الهائل من البكتيريا التي تعيش في الأمعاء الغليظة . وهذه البكتيريا في العادة (ومنها نوع منتشر وهو النوع الذي تمت دراسته باسهاب *(Es-cherichia coli* غير ضارة تماماً. وأثناء عمليات نشاطها الحيوي ، فان تلك البكتيريا قد تفرز غازات ومواد تالفة أخرى ذات رائحة . وتتكاثر هذه البكتريا بكثرة لدرجة أن ١٠-٥٠٪ من الوزن الجاف للبراز قد يتكون من تلك الخلايا البكتيرية .

ومن وقت إلى آخر، قد توجد بكتيريا ضارة أو بروتوزوا في الأمعاء الغليظة . فحمى التيفود، والكوليرا الأسيوية ، والدوسنتاريا الأميبية هي تلك الأمراض التي تسببها الطفيليات المعوية ، وقد تغزو هذه الطفيليات أعضاء أخرى من الجسم مثل الكبد مسببه ضرراً بالغاً.

والوظيفة الرئيسية للأمعاء الغليظة هي إعادة إمتصاص الماء ، إذ تفرز كميات هائلة من الماء في المعدة والأمعاء بواسطة غدد الهضم العديدة و لابد من تعويض هذه الكمية إذا ما أردنا أن نجنب الحيوان المعاناة من الجفاف والعطش. ويعاد إمتصاص أغلبية الماء في الأمعاء الغليظة أثناء الساعات ١٢-١٤ من بقاء بقايا الغذاء في تلك الأمعاء . وأحياناً تصبح الأمعاء الغليظة معرضة للهياج وتطرد محتوياتها إلى المستقيم ثم إلى الخارج

عن طريق فتحة الشرج قبل الانتهاء من إكمال عملية إعادة الامتصاص، ويطلق على الحالة الناتجة عن ذلك بالإسهـال (Diarrhea) ، ولربما أنك قد لاحظت ظاهرة العطش التي تصـاحب الاصـابـة بالإسهـال. من جهـة أخرى، قد تحتفظ الأمعاء الغليظة بمحتـوياتهـا لمدة طويلة فتصبـح مادة الـبراز، والتي تسمى بهذا الاسم الآن، جافة وتنضغط في كتل جافـة وصلبة، وتعرف هذه الحالة بالإمساك (Constipation).

ويمر البراز من الأمعاء الغليظة إلى المستقيم في أنبوبة على شكل حرف S ، وهنا تبقى المواد البرازية لحين إنفراج المصين اللذين يحرسان فتحة الشرج، وتحدث موجات ذاتية قوية تطرد البراز إلى الخارج.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تحتاج جميع الكائنات مواداً من الجزيئات العضوية الصغيرة لتعمل كوقود وكمواد يبـدأ بها الكـائن تخليق الجـزيئات الأكبر المميزة لهذا الكائن. ويتكون غذاء معظم الكـائنـات شاذة التغذية من مزيج من تلك الجزيئات الكبيرة. وقبل أن تلبي تلك الجزيئات الكبيرة الإحتياجات الغذائية للكائن، فلابد لها من أن تهضم. والهضم هو تحلل الجزيئات الكبيرة إلى الوحدات الأصغر التي تتكون منها.

ويحلل الأميليز النشـا إلى مزيج من المالتوز والجلوكوز. ويحلل الليبيز الدهون إلى مزيج من الجليسيرول والأحماض الدهنية، والجليسيريدات الأحادية. ويحلل البروتييز البروتينات إلى مزيج من الببتيدات. ويكمل الببتيديز هضم البروتينات بالتحليل المائي للببتيدات إلى مكوناتها من الأحماض الأمينية.

وفي الإنسان، تفرز بعض إنزيمات الهضم في السوائل الهضمية بينما إنزيمات أخرى (مثل أمينو ببتيديز وإنزيمات ثنائيات التسكر) تكون مرتبطة بأغشية الخلايا التي تغطى الخمائل.

وتدخل المنتجات الهضمية خلايا الخمائل بالإنتشار والإنتشار الميسَّر والنقل النشط. وتلعب الكبد أدواراً عدة في عملية التغذية، فتساعد الصفراء في هضم المواد الدهنية، كما تخزن الكبد أيضاً الزيادة من المواد الكربوهيدراتية (على صورة جليكوجين) حتى يمكنهـا أن تنقله إلى الـدورة الدموية عندما تتطلب الحاجة إليها، وتكسر الأحماض

الأمينية الزائدة منتجة مواداً لاستخدامها في الحصول على الطاقة.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ وضح الخطوط العامة لهضم سندوتش لحم (بروتين ودهون والنشا).

٢ ــ ارسم المعادلة التركيبية للجزىء ٢ - جليسيريد الأحادي لحمض البالميتيك ك١٥ يد٣١ ك أ أ يد).

٣ ــ بأي وسيلة يمكن للأحماض الأمينية الموجودة في الأمعاء الدقيقة أن تدخل الخلايا الطلائية للخمائل؟

٤ ــ هل تحدث عملية هضم الجزيئات الكبيرة في القناة الهضمية فقط؟ إشرح.

٥ ــ كيف يمكن للخلايا التي تفرز إنزيمات خارجها أن تتفادي هضم نفسها؟

٦ ــ هل تعيش أي كائنات وتتغذى عن طريق المرشح على اليابسة؟ وضح.

المراجع REFERENCES

1. BAYLISS, W. M. and E. H. STARLING, "The Mechanism of Pancreatic Secretion," Great Experiments in Biology, ed. by M. L. Gabriel and S. Fogel, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1955. Deals with secretion and how it was discovered.
2. DAVENPORT, H. W., "Why the Stomach Does Not Digest Itself", Scientific American, Offprint No. 1240, January, 1972.
3. KRETCHMER, N., "Lactose and Lactase", Scientific American Offprint No. 1259, October, 1972. In many human populations, the adults lack lactase and cannot digest milk.
4. MCMINN, R, M. H., "The Human Gut", Oxford Biology Readers, No. 56, Oxford University Press, Oxford 1974.
5. YOUNG, V. R., and N. S. SCRIMSHAW, "The Physiology of Starvation", Scientific American, Offprint No. 1232, October, 1971.
6. KAPPS, A., and A. P. ALVARES, "How the Liver Metabolizes Foreign Substances", Scientific American, Offprint No. 1322, June, 1975.

CHAPTER 21 الباب الحادي والعشرون

تبادل الغازات في النباتات والحيوانات

GAS EXCHANGE IN PLANTS AND ANIMALS



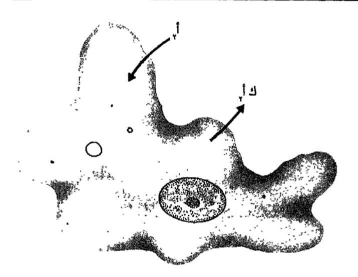
الباب الحادي والعشرون
تبادل الغازات في النباتات والحيوانات

لكي تقوم عملية التنفس، تحتاج الخلايا مددا من الأكسجين ووسيلة للتخلص من ثاني أكسيد الكربون. وللقيام بعملية البناء الضوئي، تحتاج خلايا النباتات الخضراء إلى مدد من ثاني أكسيد الكربون ووسيلة للتخلص من الأكسجين. وعلى ذلك، فجميع الخلايا تقريبا تكون منشغلة في مشكلة تبادل الغازات مع البيئة.

وكما رأينا، فان بيئة الخلايا هي السائل الذي تعوم فيه تلك الخلايا (ECF) ولكى يمكن للغازات أن تدخل وتخرج من الخلايا، لابد لها من أن تذوب في هذا السائل (ECF).

١٢-١. تبادل الغازات في الكائنات المائية:
GAS EXCHANGE IN AQUATIC ORGANISMS

من بين الأحياء الدقيقة المائية الأميبا، والسائل الخلوي البيئي (ECF) هو ببساطة الماء المحيط بها. و النسبة بين مساحة السطح إلى الحجم في الأميبا تكون كافية لدرجة كبيرة لإمكانية حدوث عملية إنتشار بسيط للغازات بين الخلية والماء (الشكل ١٢-١). وعند تنفس ا لأميبا، فان استهلاك الأكسجين بواسطة الميتوكوندريا الموجودة بها يقلل من تركيز الأكسجين داخل الخلية. وإذا ماكان تركيز الأكسجين أكبر في الماء الخارجي عنه في داخل الخلية، فان الأكسجين يمر الى داخل الخلية بالانتشار. وتركيز الأوكسجين في الماء بدوره، يحتفظ بكميته ثابته في الماء عن طريق عدة طرق: (أ) إنتشار الأكسجين من الهواء إلى الماء، (ب) إنتاج الأوكسجين أثناء عملية البناء الضوئي بواسطة النباتات المائية (الشكل ١٢-٢).



شكل ٢١-١ : تبادل الغازات في الأميبا. يدخل الأوكسجين ويترك ثاني أكسيد الكربون بالأنتشار.

فبينما تستهلك الأميبا الأكسجين، فهي تنتج ثاني أكسيد الكربون. فاذا ما أصبح تركيز هذا الغاز (ك أ٢) داخل الخلية أكبر منه في الماء المحيط بها، فانه أي (ك ا٢) يمر من الخلية للخارج عن طريق الانتشار. ويحتفظ ثاني أكسيد الكربون بتركيزه في الماء تحت درجة تركيز منخفضة نسبيا بوسيلتين:

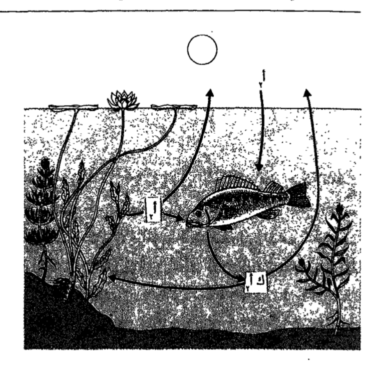
١ ـــ إستهلاكه بواسطة النباتات المائية بطريقة البناء الضوئي.

٢ ـــ إنتشاره في الهواء.

وحتى بين النباتات والحيوانات الأصغر التي تعيش في الماء، فان نسبة السطح للحجم ربما تكون كبيرة لدرجة كافية لحدوث إنتشار بسيط لسد الحاجة إلى تبادل الغازات. ولربما شكل حيوان البلاناريا (Planaria) المفلطح والشريطي (شكل ١٢-٣) لأفضل مثل ملائم يسمح للأنتشار السريع لتبادل الغازات بين داخل الخلايا والبيئة المحيطة بالحيوان.

وفي الحيوانات المائية الأكبر فان نسبة السطح للحجم تكون أصغر، فالكثير من خلايا تلك الحيوانات يكون وجودها عميقا داخل الجسم لدرجة يصعب معها قيامها بتبادل الغازات مع البيئة عن طريق الانتشار وحده، إذ أن الخلية الداخلية النشطة في تنفسها لاتستطيع الحصول على الأكسجين بالسرعة الكافية عن طريق الانتشار من خلية إلى أخرى.

والحل الواسع الأنتشار لهذه المشكلة هو إستحمام الخلايا الداخلية في سائل دائم موجود في داخل جسم الكائن، وتستحم كل خلية بهذا السائل، وبفعلها هذا تجلب



شكل ٢١-٢ : تبادل الغازات في بركة مياة عذبة. يفرز الأوكسجين ويستهلك ثاني أكسيد الكربون أثناء البناء الضوئي يفرز ثاني أكسيد الكربون ويستهلك الأوكسجين في التنفس الخلوي.

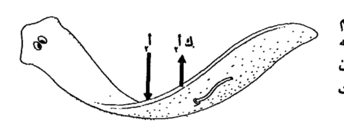
الأكسجين إليها وتبعد ثاني أكسيد الكبرون عنها. ولابد لها أيضا من الحصول على الأكسجين الطازج من المياه المحيطة وإفراز ثاني أكسيد الكربون المتجمع في داخل هذه المياة كذلك، ويتطلب هذا وجود عضو خاص لتبادل الغازات. وفي القشريات، والرخويات (القواقع) والأسماك، تكون الخياشيم أعضاء تبادل الغازات. والخياشيم تمثل سطحا كبيرا للماء الذي يغطيها، وتزود الخياشيم بالدم الذي يحمل الأكسجين منها إلى الأنسجة الداخلية بالجسم. ويلتقط الدم ثاني أكسيد الكربون من الأنسجة الداخلية ويحمله إلى الخياشيم، من الخياشيم يذهب ثاني أكسيد الكربون هذا إلى الماء عن طريق الانتشار. وبذلك توجد ثلاثة أجزاء رئيسية وضرورية للجهاز:

١ ـ السائل الدوري الذي يحمل الغازات، ويستمر هذا السائل في الدوران بمساعدة طلمبة عضلية هي القلب.

٢ ـ الخياشيم التي تقوم بعملية تبادل الغازات بين السائل الدوري (البيئة الداخلية) وبين الماء (البيئة الخارجية).

٣ ـ الوسيلة اللازمة للسحب المستمر للماء الغني بالأكسجين فوق الخياشيم.

وفي حيوان بلح البحر (Clam) فان الحركة الذاتية للأهداب التي تغطى الخياشيم تسحب الماء للداخل خلال السيفون الداخل عن طريق الثقوب الموجودة بالخياشيم



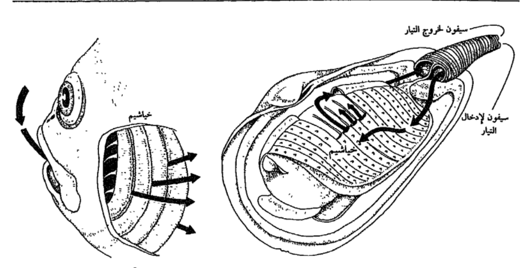
شكل ٢١-٣: كل خلية في جسم حيوان البلاناريا قريبة بما فيه الكفاية من السطح لأجل أن تكون احتياجات تبادلها للغازات عن طريق الانتشار.

وللخارج عن طريق السيفون الخارج (الشكل ٢١-٤) وفي الأسماك، فان حركة تثاقب الفم (فتحه وقفله) (Yawning) تسحب الماء إلى داخل الفم، ثم بعد ذلك يقفل الفم، وينقبض فراغ الفم الذي يدفع الماء خلال الأقواس الخيشومية التي تدعم الخياشيم الرئيسية، ثم يطرد الماء في النهاية خلال الشقوق الموجودة عند النهاية الخلفية لغرفة الخياشيم (الشكل ٢١-٤).

٢١-٢ . الماء في مقابل الهواء: WATER VERSUS AIR

تعتبر مشكلة تبادل الغازات في الكائنات الأرضية أبسط مما هي في الكائنات المائية. ويكون الأكسجين نحو ٢١٪ من حجم الهواء. لذلك فأن الكائن الأرضي يحصل من ١٠٠ ملليلتر هواء عن طريق تبادل الغازات على ٢١ ملليلتر من الأكسجين. ومن جهة أخرى، ففي الماء جيد التهوية، نادراً ما يزيد تركيز الأكسجين عن ملليلتر واحد من الغاز في كل ١٠٠ ملليلتر من الماء، ونتيجة لذلك فان الكائن المائي لابد من تعريض خياشيمه لمساحة كبيرة من الماء الجاري للوفاء باحتياجاته من الأكسجين. ولربما يساعد هذا الفرق في توافر الأكسجين في الهواء والماء في تفسير ظاهرة لماذا نجد أن الحيوانات ذوات الدم الحار فقط هي الحيوانات القادرة على الحفاظ على درجة حرارة ثابتة للجسم باستخدام الحرارة المولدة بالتنفس الخلوي، ومن تلك الحيوانات الطيور والثدييات التي تتنفس الهواء.

ومن جهة أخرى يواجه الكائن الأرضي بمشكلة الحفاظ على رطوبة جهاز تبادل الغازات به، حتى عند تعرضه للهواء الجاف. وكما ناقشنا من قبل، فان إنتشار الغازات إلى داخل الخلايا يحدث فقط من الـ (ECF)، وقد يكون هذا السائل (ECF) مكونا من فيلم رقيق من الرطوبة، ولكن لابد من وجوده. والحل الشامل لهذه المشكلة هو في وجود عضو لتبادل الغازات يكون ممتدا بداخل الكائن، وبهذه الطريقة فان الهواء المار في عضو



الشكل ٢١-٤ . حيوانان يتنفسان بالخياشيم . تم قطع جزء من السمكة لأظهار الخياشيم . في بلح البحر تم ابعاد الصدفة اليسرى وأجزاء من الخياشيم اليسرى لمشاهدة المسار الذي يسلكه الماء .

تبادل الغازات هذا يمكن ترطيبه مسبقا بأغشية مساعدة وتقليل تأثيرة الجاف .

٢١-٣ . تبادل الغازات في الجذور والسيقان :
GAS EXCHANGE IN ROOTS AND STEMS

لاتمتلك النباتات جهازا خاصا بتبادل الغازات (فيما عدا حالات خاصة لايمْكن تلافيها!) ، وتوجد عدة أسباب تبين إمكانية مغيشة النباتات بدون تلك الأجهزة . أولا ، أن كل جزء من النبات يعتنى باحتياجاته الشخصية من تبادل الغازات ، إذ يوجد القليل جدا من حمل الغازات من جزء من النبات إلى جزء آخر ، ولو أنه يوجد بالنباتات جهاز حمل كفء للسوائل (والذي سوف نقوم بدراسته في الباب التالي) ، إلا أن هذا الجهاز لا يتدخل في عملية نقل الغازات .

وثانيا ، لا تحتاج النباتات للكثير من متطلبات تبادل الغازات ، فالجذور ، والسيقان ، والأوراق ، تتنفس بمعدلات أقل بكثير عما تتميز به الحيوانات . وفقط عند عملية البناء الضوئي يحدث الكثير من تبادل الغازات كما سنري ، إذ أن كل ورقة مهيأة للقيام بعملية تبادل الغازات التي تحتاج إليها أثناء عملية البناء الضوئي .

وثالثا ، فان المسافة التي لابد للغازات أن تنتشر فيها في نبات ولو كان كبيرا جدا وضخما ، لهي مسافة ليست بالكبيرة . فكل خلية في النبات توجد ملاصقة لسطح

النبات، ويمكن للنبات الحصول على ذلك كما يفعل حيوان البلاناريا، أي بترتيب خلاياه في طبقات رقيقة تؤدى إلى وجود نسبة مرتفعة من السطح - إلى - الحجم كل ذلك يكون جيدا بالنسبة للأوراق، ولكن ماذا يكون حال السيقان والجذور السميكة؟ في الحقيقة، الحال في تلك الأجهزة لا يختلف كثيرا عنه في حالة الأوراق، إذ أن الخلايا الحية الوحيدة الموجودة في الساق مرتبة على شكل طبقات داخل وتحت القلف مباشرة، أما عن الخلايا الموجودة بداخل الساق الخشبي فهي خلايا ميتة وتعمل فقط كدعامة ميكانيكية.

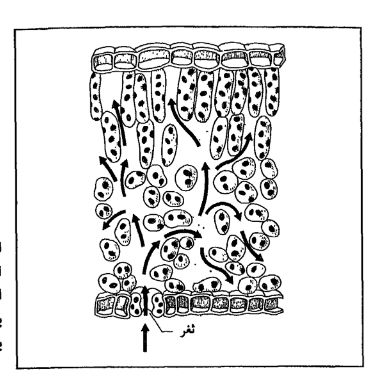
وأخيرا، فان أغلب خلايا النبات لها ولو جزء من سطحها ملاصقا للهواء. فالتجمع السائب للخلايا البرنشيمية في الأوراق والسيقان والجذور يمد النبات بجهاز داخلي موصل للفراغات الهوائية، فتنتشر الغازات خلال الهواء عدة الاف من المرات أسرع مما في الماء، وعلى هذا فمجرد دخول الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الممرات الهوائية لتلك الشبكة الداخلية، فأنها تنتشر بداخلها بسرعة (الشكل ٢١-٥).

وتغلف السيقان الخشبية والجذور التامة النمو بطبقات من خلايا الفلين الميتة والمشبعة بمادة غير نفاذة للماء تسمى سوبرين (Suberin)، ويعمل هذا الغلاف على تقليل فقد الماء من النبات، وهي وظيفة نافعة جدا للنبات، علما بأن الفلين غير منفذ للأكسجين وثاني أكسيد الكربون مثل الماء تماما. وعلى أية حال، فالفلين المغلف للسيقان الخشبية والجذور التامة النمو مثقب بثقوب تسمى عديسات (Lenticels) (الشكل ٢١-٦)، وهي تسهل للأكسجين الوصول الى المسافات البينية للنسيج الداخلي، وتسمح كذلك لثاني أكسيد الكربون بالخروج إلى الجو.

وفي كثير من النباتات الحولية، تكون السيقان خضراء اللون وهامة في القيام بعملية البناء الضوئي تماما مثل الأوراق. وفي تلك السيقان، تكون وسيلة تبادل الغازات مشابهة تماما لوسيلة التبادل في الأوراق.

٢١-٤. تبادل الغازات في الورقة: GAS EXCHANGE IN THE LEAF

في الباب الثامن، تمت دراسة كيف أن تركيب الورقة يساعدها على القيام بوظيفتها الأساسية وهي البناء الضوئي. وتحتاج الورقة التي تقوم بالبناء الضوئي بسرعة إلى مدد ثابت ومستمر من ثاني أكسيد الكربون، كما ولابد لها من إطلاق حجم مماثل من

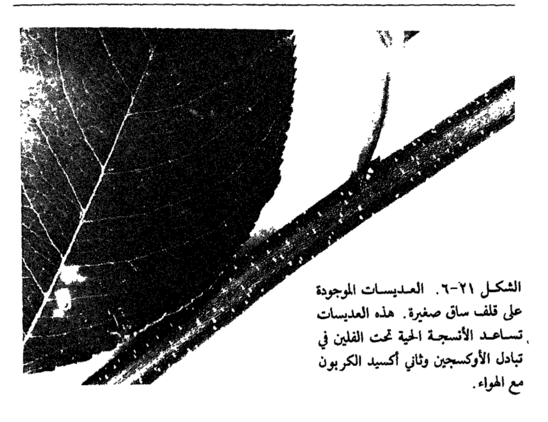


الشكل ٢١-٥. التجمع المخلخل للخلايا في أغلب الأنسجة النشطة في الأيض بالنبات (هنا ورقة) للسماح بالأنتشار السريع للغازات.

الأوكسجين أثناء تلك العملية . ويحدث تبادل الغازات خلال ثقوب في سطح الورقة هي الثغور (Stomata) (مفردها Stoma).وعند نشاط عملية البناء الضوئي عن طريق الورقة، فان محتويات الهواء من ثاني أكسيد الكربون في الفراغات الهوائية للطبقة الأسفنجية يصبح أقل من ٠,٠٣٪ الموجود في الهواء الخارجي. ونتيجة للفرق في التركيز، ينتشر ثاني أكسيد الكربون من الهواء الجوى الخارجي خلال الثغور إلى الفراغات الهوائية للطبقة الأسفنجية ومنها إلى أعلى خلال الفراغات البينية الموجودة بين خلايا الطبقة العمادية (Palisade) ، وبعد الذوبان في فيلم الرطوبة الذي يغطى أسطح كل خلية في داخل الورقة، ينتشر في داخل الخلايا وسيتوبلازم هذه الخلايا غنى بامدادته من إنزيم كربون هيدريز Carbon hydrase) والذي ينشط تكوين حمض الكربونيك كما يلي :

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-.$$

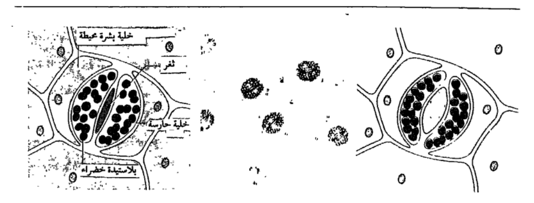
وهذا هو المنبع السريع لثاني أكسيد الكربون لتفاعلات الظلام في البناء الضوئي . وينتشر الأوكسجين الناتج من تفاعلات الضوء من الخلايا إلى المسافات البينية ومنها إلى الخارج عن طريق الثغور.



الشكل ٢١-٦. العديسات الموجودة على قلف ساق صغيرة. هذه العديسات تساعد الأنسجة الحية تحت الفلين في تبادل الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون مع الهواء.

وتحت أغلب الظروف، تفتح الثغور عندما يلمس الضوء سطح الورقة في الصباح وتقفل أثناء الليل. وتم إجراء الكثير من التجارب لأكتشاف كيفية تحكم الضوء بالفعل في فتح الثغور، ولكن حتى الآن لم تفسر طريقة واحدة كل بيانات التجارب. ويبدو أن السبب المباشر هو تغير الأمتلاء (Turgor) في الخلايا الحارسة (Guard Cells). والجدار الداخلي لكل خلية حارسة سميك ومرن، أما عن الجدار الخارجي فهو أرق بكثير. فعند حدوث الأمتلاء داخل الخليتين الحارستين المكونتين للثغر، تنبعج الجدر الخارجية الرقيقة للخارج وتدفع الجدر الداخلية لتأخذ شكل الهلال (الشكل ٢١-٧)، وذلك يفتح الثغر. وعند فقد الخلايا الحارسة لأمتلائها، الذي يمكن أن يحدث بالتجربة بغمرها في محلول متعادل مع سيتوبلازمها، تحتفظ الجدر الداخلية المرنة لتلك الخلايا بالشكل الأصلي وتقفل الثغور.

ويعتمد بناء الأمتلاء في الخلية على نشوء فرق في الضغط الأسموزي بين تلك الخلية وبين الوسط المحيط بها. ويوضح الشكل (٢١-٨) الضغط الأسموزي عند فترات مختلفة من اليوم مقاسة داخل الخلايا الحارسة لنبات واحد. فعندما يصبح الضغط الأسموزي داخل الخلايا الحارسة أكبر منه في خلايا البشرة السفلي المحيطة، تفتح



شكل ٢١-٧. الثغور: مقفلة (يسار) ومفتوحة (يمين). تفتح الثغور عندما يزداد الإمتلاء بداخل الخلايا الحارسة. الضوء الساقط على الورقة ينبه التفاعلات المؤدية الى هذا التأثير.

الثغـور. وفي المسـاء، عند هبوط الضغط الأسموزي للخلايا الحارسة إلى الضغط الأسموزي للخلايا المحيطة، تقفل الثغور.

ولكى يزداد الضغط الأسموزي داخل الخلايا الحارسة، لابد من إنخفاض تركيزها المائي إلى ما يعادل ضغط الخلايا المحيطة. وبطريقة أخرى، لابد من تجمع الأملاح (الأيونات، أو الجزيئات الصغيرة) في السيتوبلازم، ويبدو أن هذه هي الحالة. فعند التعرض للضوء، تتجمع أيونات البوتاسيوم بسرعة داخل الخلايا الحارسـة، ولابـد من تدخـل آلية النقـل النشط لأن تركيز أيونـات البـوتاسيوم داخل الخلايا الحارسة المفتوحـة يفـوق بكثـيرة تركيزه في الخـلايا المحيطة. ولا تعرف بالضبط حتى الان الميكانيكية الحقيقيـة التي يحـدث بها ذلك، ولـو أنه يوجد احتمال واحـد هو ضخ (Pumping) الـبروتـونـات بالأوسمـوزيـة الكيميائيـة (chemiosmosis) (انـظر قسم ٧-١٠) الذي يزود الطاقة اللازمة.

ومن المشاكل الكبري في تبادل الغازات في الكائنات الأرضيـة الحفاظ على خلايا أو نسيج تبادل الغازات رطبا لتلافي التأثير المجفف للهواء. والحل الموجود في الورقة الخضراء هو نموذج للحل في كل الكائنات الأرضية الحقيقية. فالخلايا التي لها علاقة بتبادل الغازات تكون مبيتة في فراغ داخل الكائن، ويحضر الهواء إلى الخلايا الرطبة بواسطة فتحات في الجدار الخارجي الغير منفذ للماء والهواء. وخلايا البشرة في الورقة مغطاة بالكيوتين (Cutin)، وتقلل هذه المادة كثيراً من فقد الماء في الورقة، وتمنع كذلك من حدوث أي تبادل ذو قيمة للغازات، فالثغور، على أية حال، تسمح بمرور الغاز المتحكم فيه من والي داخل الورقة.

الشكل (٢١-٨): الضغط الأسموزي في خلايا حارسة نموذجية. يبقى الضغط الأسموزي لخلايا البشرة السفلي الأخرى ثابتا عند ١٥٠ رطل/ البوصة المربعة أثناء اجراء هذه التجربة.

الوقت	الضغط الأسموزي، رطل/ بوصة مربعة
٧ صباحا	٢١٢
١١ صباحا	٤٥٦
٥ مساءا	٢٧٢
١٢ منتصف الليل	١٩١

فأي هواء غير مشبع جيدا ببخار الماء (١٠٠٪ رطوبة نسبية) سيعمل على حفاف أسطح الخلايا التي سيلامسها. ولذلك، فالورقة التي تقوم بعملية البناء الضوئي، بالرغم من تحوراتها الدفاعية، ستفقد مع ذلك كميات لا بأس بها من الماء إلى الهواء بالتبخير، ثم يمر هذا الماء المتبخر لخارج الورقة (عن طريق الثغور) في عملية يطلق عليها النتح (transpiration)، ولابد من تعويض الماء الناتج بنقل المزيد من الماء من التربة إلى الأوراق عن طريق الجذور والسيقان.

وضرورة الحفاظ على خلايا عضو تبادل الغازات مزوداً بالرطوبة باستمرار لابد وأن يكون لها بعض الفوائد للنبات. فالنتح (كالعرق) هي عملية تبريد، وكما سنري في الباب الثاني والعشرين، هو الناقل الميكانيكي للعناصر الغذائية الغير عضوية الآتية من الجذور إلى الأوراق.

وعند جفاف الهواء المحيط، قد يزيد معدل النتح عن مقدرة الجهاز الجذرى لأمداد الماء المراد تعويضه، ويمكن تجنب هذا الموقف الحرج بقفل الثغور، فكل ثغر يعمل كجهاز حساس للرطوبة ويقفل عند تعرضه لأي إنخفاض في مستوى الرطوبة بين داخل وخارج الورقة.

تبادل الغازات في الحيوانات الأرضية

GAS EXCHANGE IN TERRESTIAL ANIMALS

إن حل مشاكل الغازات في معظم الحيوانات الأرضية مع الهواء أمكن علاجها

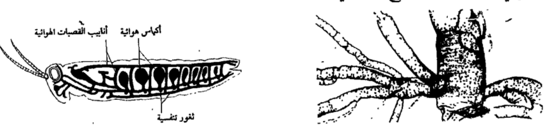
بطريقة مشابهة لتلك المستخدمة في النباتات الخضراء. فأجهزة تبادل الغازات موجودة داخل فراغ الجسم حيث تكون في حماية من التلف الميكانيكي، وأهم من ذلك، من تأثير الزيادة في جفاف الهواء. وغالبا ما يزود جهاز تبادل الغازات بغدد تعوض الماء الذي يفقد عن طريق البخر.

وفي الحشرات وبعض الحيوانات اللافقارية الأرضية، يحدث تبادل للغازات بين الأنسجة والهواء بواسطة جهاز شبكى من الأنابيب المملوءة بالهواء، والمسماه بالقصبات الهوائية (Tracheae). و بعض الفقاريات التي تتنفس الهواء تستخدم الرئات (Lungs) كأعضاء لتبادل الغازات.

٢١-٥. التنفس بالقصبات الهوائية: TRACHEAL BREATHING

يمثل الجهاز القصبي في النطاط نموذجا للاجهزة القصبية الموجودة في جميع الحشرات (الشكل ٢١-٩). وتفتح القصبات الهوائية للخارج عن طريق ثقوب صغيرة في الهيكل الخارجي تسمى بالثغور التنفسية (Spiracles)، فيوجد على كل من الحلقة الصدرية الأولى وكذلك على الحلقة الصدرية الثالثة زوجا من الثغور، ثغر على كل جانب. كما توجد ثمانية أزواج أخرى من الثغور التنفسية مرتبة في خط على كل من جانبي البطن. ويحرس الثغور التنفسية أشواك (شعيرات) تساعد على حجز التراب والمواد الأخرى الغريبة من الهواء قبل دخولها الى القصبات الهوائية. ويحرس الثغور أيضا صمامات تتحكم فيها عضلات خاصة تساعد النطاط على تنظيم فتح وقفل تلك الثغور التنفسية.

وتؤدي الثغور التنفسية إلى أنابيب القصبات الهوائية الرئيسية (Tracheal)، والتي تؤدي بدورها الى أفرع أدق هي القصيبات الهوائية (Tracheales)، وتخترق تلك

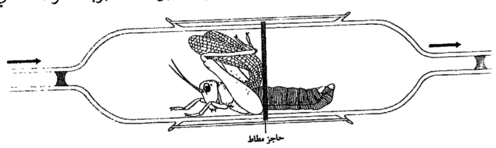


الشكل ٢١-٩. يسار: الجهاز القصبي في نطاط. يمين: صورة دقيقة لأنابيب القصبات الهوائية (بتصريح من تيرتكس).

الفريعات الدقيقة كل جزء في جسم الحشرة، وعند أطرافها النهائية، قد يصل قطرها الىٰ نحو ١,٠ من الميكرون، وتكون تلك النهايات مملوءة بسائل. ويذوب الأكسجين المنتشر في هذا السائل ثم بعد ذلك ينتشر إلى الخلايا المجاورة. وربما تكون كل خلية في جسم الحشرة ملاصقة لواحد على الأقل من تلك الأنابيب الطرفية الدقيقة أي القصيبات.

ويدعو تركيب القصبات الهوائية إلى الغرابة، فجدرها لابد و أن تكون صلبة حتى لا تنضغط على بعضهـا البعض نتيجة لوزن الأجهزة الأخرى المحيطة، وتزود تلك الصلابة بواسطة خيط حلزوني من الشيتين (Chitin) موجود على جدار القصبات من الداخل (الشكل ٢١-٩). ومع ذلك فلابد من وجود حدود للضغط الذي يمكن لتلك التركيبات أن تتحمله بـدون تلفها أو بدون قفل الممر الهوائي وهذا هو السبب في كون أن الحشرات صغيرة الحجم نسبيا، إذ أن زيادة ثقل الأنسجة في حيوان في مثل حجم الأرنب، على سبيل المثال، قد يهشم جهازا من الأنابيب المملوءة بالهواء.

وفي الحشرات الأصغـر أو الأقـل نشاطا، يكون مرور الأوكسجين خلال الجهاز القصبي عن طريق الأنتشار البسيط. ومن ناحية أخرى، نجد أن الحشرات الكبيرة أو النشـطة مثل النطاطات تملاء قصباتها الهوائية بالقوة، فانقباض العضلات في البطن يضغط الأجهـزة الداخلية ويدفع الهواء إلى خارج القصبات الهوائية وبمجرد إنفراج العضلات، تقفز البطن إلى حجمها الطبيعي ثانية وينسحب الهواء إلى داخل الجهاز القصبي. وتوجد أكياس هوائية متصلة ببعض أجزاء من الأنابيب القصبية الرئيسية وتـزيد من فعـالية خروج ودخـول الهـواء المذكـور. وبواسطـة تجربة كالموضحـة في



الشكل ٢١-١٠. تجربة فرينكل لشرح الانسياب في اتجاه واحد للهواء خلال النطاط. والسائل المقفول بالأنابيب يتحرك الى اليمين كلما دخل الهواء في أزواج الثغور الأربعة الأولى ويخرج من الستة أزواج الأخيرة من الثغور. ويمنع الحاجز المطاط سريان الهواء فيما عدا خلال النطاط.

الشكـل (٢١-١٠) (أجـريت لأول مرة بواسطة عالم فسيولوجيا الحشرات جوتفريد فرينكل Gottfried Fraenkel) يمكن أن يوضح المرء أن هذا العمل منسق بحيث يكون مرور الهواء في إتجاه واحد، فيدخل الهواء خلال أول أربعة أزواج من الثغور الموجودة في البطن. واندفاع الهواء من طريق واحد يزيد من كفاءة تبادل الغزات، فيمكن للهواء الفقير في الأوكسجين أن يطرد بدون أن يختلط مع التيار من الهواء النقى.

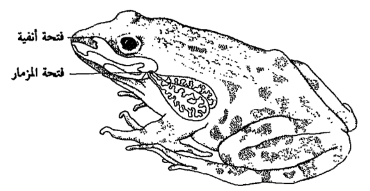
وحتى في الحشرات المائية فأنها تمتلك جهازا قصبيا، فبعضها (مثل يرقات البعوض) تضمن دخول هوائها بامتلاكها لسيفون تنفس تخرجه فوق سطح الماء للحصول على الهـواء الجـوى مبـاشرة (الشكل ٢١-١١). وتتصل الأنبوبة (الموجودة في السيفون) بالجهاز القصبي لليرقة. ويمكن لحشرات أخرى أن تغطس في الماء لمدد طويلة، ولكن كي تقـوم بذلك، فانها تحمل معها فقاعة من الهواء والتي منها يمكنها الحصول على الأوكسجين. وفي حشرات مائية أخرى توجد ثغور تنفسية محمولة على أطراف زوائد شوكية طويلة، وبهذه الأشواك تخرق الحشرة أوراق النباتات الموجودة تحت سطح الماء وتحصل منها على الأوكسجين الموجود على هيئة فقاقيع متكونة داخل الأوراق. وحتى في الحشرات المـائية التى لها خياشيم فبعـد إنتشار الأوكسجين من الماء إلى داخل تلك النمـوات الخـارجية (الخياشيم) يدخـل الأوكسجين بعد ذلك إلى القصبات الهوائية المملوءة بالغازات والتي تحمل الأوكسجين بعد ذلك إلى أنسجة الجسم المختلفة.

٢١-٦. المتنفسون بالرئات : LUNG BREATHERS

من بين الفقـاريات الأرضية (الـبرمـائيات، الزواحف، الطيور، الثدييات) فان أعضاء تبادل الغازات بها عبارة عن الرئتين. . ففي الضفدعة، تكون الرئتان كيسين



الشكـل ٢١-١١. يرقـة البعوضة تتنفس الهواء حتى ولو أنها تعيش وتتغذى تحت الماء.



الشكل ٢١-١٢. رئات الضفدعة تنتفخ الرئات باندفاع الهواء لأسفل خلال فتحة المزمار. الجلد وبطانة الفم تستخدمان أيضا في عملية تبادل الغازات.

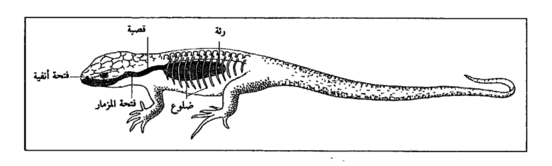
رقيقي الجدر موجودين في فراغ الجسم عن طريق فتحة المزمار (Glottis) (الشكل ٢١-١٢). وتزداد المساحة السطحية للرئتين بجهاز عبارة عن حواجز داخلية غنية بالأوردة الدموية. ولكي تنفخ الضفدعة الرئتين لملئهما بالهواء فلابد أولا من ملأ فمها بالهواء بفتح الأنف وخفض قاعدة أو أرضية الفم ثم تقفل الضفدعة الفتحات الداخلية لفتحتى الأنف، وتفتح فتحه المزمار، وترفع أرضية الفم. كل تلك الأفعال تدفع الهواء من الفم إلى الرئتين، فتنتفخان وفي الحقيقة، يمكن للضفدعة أن تدفع الكثير من الهواء إلى داخل رئتيها إلى درجة أن تتمدد الرئتان وتملان جميع فراغ الجسم.

ويذوب الأوكسجين الموجود في هذا الهواء في فيلم من الرطوبة موجود على سطح الخلايا الطلائية للرئتين، ثم ينتشر الأوكسجين بعد ذلك من الخلايا الطلائية إلى الشعيرات الدموية الدقيقة. وبمجرد دخول الأوكسجين في الدم، فان معظمه يدخل في كرات الدم الحمراء البيضاوية الشكل التي تعوم في الدم وتحتوي على الحبيبات الحمراء المسماه هيموجلوبين (Hemoglobin) وتحت الظروف الموجودة في الرئتين، يختلط الهيموجلوبين كيميائيا مع الأوكسجين ثم يتوزع الأوكسجين بعد ذلك في جسم الضفدعة في الدورة الدموية. وعند وصول الدم إلى الأجهزة الداخلية والأنسجة المختلفة، يترك الهيموجلوبين الأوكسجين الموجود به، ويصبح الاوكسجين حرا ليترك الدم ويدخل خلايا الجسم لأمدادها باحتياجاتها من التنفس، يدخل ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عملية تنفس الخلايا الدم عند الأنسجة ثم يحمل الى الرئتين ثم إلى الجلد ليخرج إلى الهواء الجوى.

ويعمل الجلد (Skin) كعضو مساعد في تبادل الغازات في معظم البرمائيات، وهو غني بالأوعية الدموية منفذ للماء والغازات، يمكنه، على أية حال، العمل على تبادل

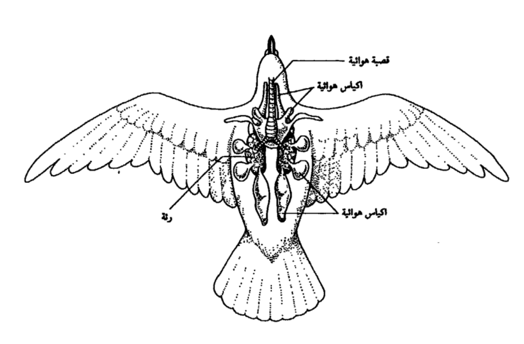
الغازات ولكن فقط عندما يكون رطبا. وتساعد خلايا مفرزة للمخاط موجودة بالجلد على أداء هذه الوظيفة، ولكنها لا يمكنها التعامل مع الجو الجاف أو مع الهواء الساخن. لذلك، فان معظم البرمائيات تعيش دائما في أماكن رطبة مثل المستنقعات، والبرك، والأرض الرطبة، وغيرها، وهذا هو أحد الأسباب الذي يجعلنا نعتبر أن البرمائيات ليست حيوانات أرضية حقيقية.

وتمتلك الزواحف (Reptiles) جلدا جافا حرشفيا غير منفذ للماء، لذلك فالقليل من الرطوبة تفقد من الحيوان عن طريق الجلد. لذلك لا توجد الزواحف في الأماكن الرطبة فقط، ولو أن الكثير منها يفعل ذلك أي يعيش في الواقع في تلك الأماكن. فالسلاحف والثعابين تكثر في الصحارى. وهي أجف البيئات. وبينما نجد أن الجلد الحرشفى يسمح بالمعيشة في أماكن ذات هواء جاف، وهو بلا أدنى شك ليس مكاناً لتبادل الغازات، لذلك تعتمد الزواحف على الرئات لتلك الوظيفة. وليست فقط للرئات في الزواحف مساحة سطحية أكبر بكثير عما في البرمائيات، ولكن التهوية في الرئات اكثر كفاءة. فالرئات تحاط بقفص من الضلوع العظمية (الشكل ٢١-٢٣) والتي أي الضلوع قد تكون منفصلة بالتبادل عن بعضها البعض ثم تتجمع ثانية مع بعضها بواسطة مجاميع متعارضة من عضلات الضلوع. فعند إبتعاد تلك الضلوع عن بعضها البعض، يزداد حجم قفص الضلوع، ويخلق هذا الأمتداد فراغا داخل الرئات التي يدخلها الهواء النقى. ويحمل هذا الهواء النقى، بالطبع إمدادات جديدة من الأوكسجين الى الأنسجة الرطبة للرئات ويدفع إنقباض قفص الضلوع الهواء الى خارج الرئات، وهذا الهواء الخارج خال من الأوكسجين ولكنه غني بثاني أكسيد الكبرون الناتج من الرئات.

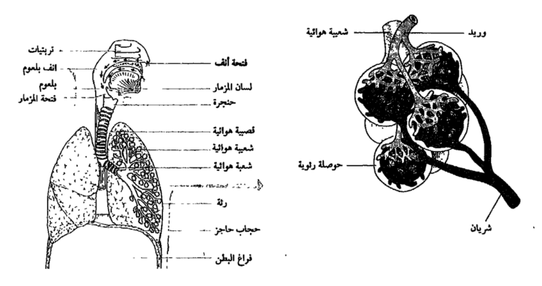


الشكل ٢١-١٣. رئات السحلية. تنتفخ بتمدد قفص الضلوع.

ولو أن التهوية في رئات الطيور تتشابه في أساسياتها مع تهوية رئات الزواحف إلا أنها تزداد كثيرا أثناء الطيران بسبب ضرب الأجنحة. وبخلاف الزواحف، فالطيور من الحيوانات ذوات الدم الحار، فتحتفظ أجسامها بدرجة حرارة ثابتة (غالبا حول ٤٠ °م) بالرغم من الاختلافات الكبيرة في درجات حرارة البيئات الخارجية، وتحتفظ الطيور بحرارتها ثابتة عن طريق الحرارة الناتجة عن النشاط العضلى، ويعتمد النشاط العضلى بدوره على الطاقة الناتجة من التنفس الخلوي. وليس غريبا إذن، أن المتطلبات من الأوكسجين لطير صغير نشط تكون كبيرة جدا. فالنموات الخارجية للرئات (الأكياس الهوائية Air Sacs) (الشل ٢١-١٤) تساعد الطيور في كفايتها من متطلباتها الزائدة هذه. ولو أنه لا يحدث تبادل غازات في تلك الأكياس، إلا أن ترتيبها التشريحي يزيد من كفاءة تهوية الرئات بامرارها الهواء الطازج إلى الرئات أثناء عملية الشهيق واالزفير. وتساعد الأكياس الهوائية كذلك في تقليل كثافة جسم الطائر بتوفير الهواء للأنسجة أو السائل في أماكن كثيرة. وعلى سبيل المثال، فان بعض عظام الطيور تكون مجوفة وتخترقها أكياس هوائية.



الشكل ٢١-١٤. الأكياس الهوائية في الحمامة. ولو أنه لا يحدث تبادل غازات في الأكياس الهوائية، فهي مرتبة بحيث يمر الهواء النقى الجديد خلال الرئات أثناء الشهيق وكذلك أثناء الزفير.

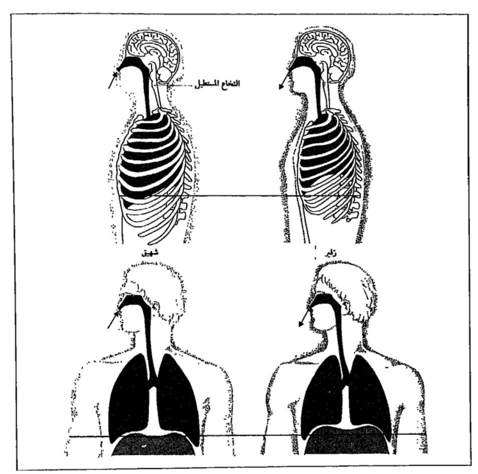


الشكل ٢١-١٥. جهاز تبادل الغازات في الإنسان. انتقال الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون بين الهواء والدم يحدث في فراغات الحويصلات الرئوية.

٢١-٧. ميكانيكية التنفس في الانسان:
MECHANISMS OF BREATHING IN HUMANS

من بين الثدييات، تتحسن كفاءة الرئات في التهوية بوجود الحجاب الحاجز (Diaphgram) وهو فاصل كالقبة في شكلة، وعضلي، ويقسم فراغ الجسم إلى جزئين: الفراغ البطنى (والذي يحتوي على الأحشاء - المعدة، والأمعاء، وغيرها) والفراغ الصدري (الذي يحتوي على القلب والرئتين - الشكل ٢١-١٥). والسطح الداخلي للفراغ الصدرى والسطح الخارجي للرئتين يغلفان بأغشية رقيقة هي الأغشية البللورية، وبمساعدة فيلم من الرطوبة موجود بينهما، فان بلورا الرئة تلتصق بالفراغ البللوري.

وتتبين ضرورة الألتصاق بين الرئتين وبين جدر الفراغ الصدري عندما يدخل الهواء بين الأغشية البللورية، فتنكسر قوة الألتصاق وتسبب المرونة الطبيعية للرئتين في تدهورها. وتحدث هذه العملية تلقائيا عند تلف الرئتين بمرض مثل السل، فتدهور الرئتين يسمح لهما بالراحة وبذلك يندملان بسرعة. وانتفاخ الرئتين ثانية ليست مشكلة إذ أن الهواء الموجود بين الأغشية البللورية يمتص في الأنسجة تدريجيا وترجع الرئتان الى حجمهما الطبيعي مرة أخرى.



الشكل ٢١-١٦. أثناء التنفس (الشهيق)، ترتفع الضلوع لأعلى وللخارج وينخفض الحجاب الحاجز. معدل وعمق التنفس تتحكم فيه النبضات العصبية الناشئة في النخاع المستطيل.

وأي عمل يزيد من حجم الفراغ الصدري يزيد من حجم الرئتين بسبب إلتصاقهما لجدر الفراغ، ويُحدث تمدد القفص الضلعي ذلك كما يحدثه في الزواحف والطيور، ولكن في الثدييات (ومنها الأنسان) تزداد تلك العملية إسراعاً بانقباض الحجاب الحاجز. فيخفض الأنقباض الحجاب الحاجز، ويسبب ذلك زيادة في حجم الفراغ الصدري، هذا بدوره يجعل الرئتين تتمددان، ويندفع الهواء الى داخلهما وعند راحة الحجاب الحاجز يرجع الى وضعه الطبيعي السابق، ويسمح للرئتين بالعودة الى حجمها السابق، وهذا يطرد الهواء منهما الى الخارج.

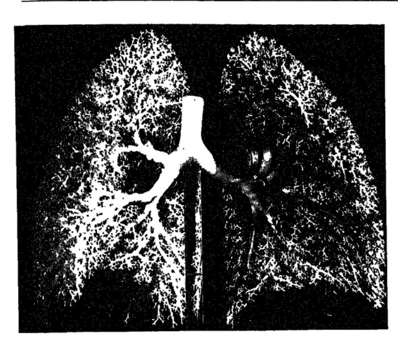
وحركة الحجاب الحاجز أثناء التنفس تشارك، ولكنها لا تكون عوضا عن، فعل القفص الضلعي. فحركة الضلوع تتحكم فيها العضلات الوربية (Intercostal)

الـداخلية والخـارجية. وأثنـاء الشهيق، تنقبض العضلات الوربية الخارجية، رافعة الضلوع الى أعلى وللخارج (الشكل ٢١-١٦)، وتزيد هذه الحركة من حجم الفراغ الصدري، وبذلك تسحب الهواء الى الرئتين. وأثناء الزفير، تنكمش العضلات الوربية الخارجية وهذا، بمساعدة المرونة الطبيعية للرئتين، يرجع الفراغ الصدرى الى أبعاده الطبيعية. وتتكرر دورة الشهيق والزفير نحو ١٥-١٨ مرة كل دقيقة في الأنسان البالغ المستريح، ويتم سحب واستنشاق ٥٠٠ ملليلتر من الهواء في كل دورة.

ويمكن، بطبيعة الحال، التنفس أكثر عمقا، إما إراديا أو نتيجة تدريبات. ويحدث الشهيق ببساطة بقوة نتيجة الأنقباض الشديد للحجاب الحاجز والعضلات الوربية الخارجية. ويعتمد الشهيق الشديد، على أية حال، على اكثر من الألتفاف المرن لتلك العضلات والرئتين. والعضلات الوربية الداخلية تجذب الضلوع لأسفل وللداخل، بذلك تقلل اكثر من حجم الفراغ الصدري، وفي نفس الوقت ينقبض الجدار العضلي للبطن، دافعا المعدة، والكبد، وغيرهما بقوة لأعلى ضد الحجاب الحاجز ومقللا من حجم الفـراغ الصـدري من هذا الأتجـاه. ومـع الشهيق والزفير الشديدين، يمكن للأنسان البالغ في المتوسط أن يملأ رئتيه بنحو أربعة لترات من الهواء في كل تنفس. ويعرف هذا بالقدرة الحيوية (Vital Capacity) للرئتين، وحتى عند نقطة أقصى زفير، يبقى في الرئتين نحو ١٢٠٠ ملليلتر من الهواء (متبقيات الهواء).

٢١-٨. مســـار الهـواء THE PATHWAY OF AIR

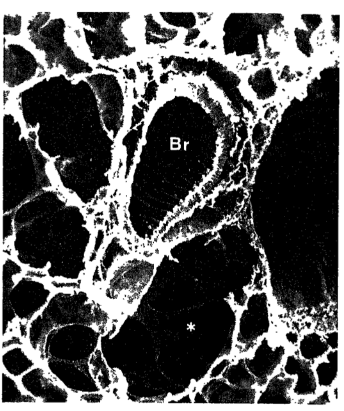
تعتمـد تهوية الرئتين، بطبيعة الحال، أيضا على وجود ممر سليم بينهما وبين الهواء الخارجي. فأثناء الشهيق يدخل الهواء من الفتحات الأنفيـة Nostrils، ويمر خلال الفراغات الأنفية (Nasal Cavities) (فراغ واحد خلف كل فتحة أنفية) ثم إلى الأنف بلعوم (Nasopharynx) (مختلطا مع أي هواء يؤخذ عن طريق الفم) ثم البلعوم الفمي (الشكل ٢١-١٥) ومن البلعوم الفمي، يمر الهواء من فتحة المزمار الى القصبة الهوائية (Trachea) وتتقـوى جدر القصبـة الهـوائية بأشرطـة من الغضاريف على هيئة حدوة الحصـان، وتمنـع هذه الأشرطة القصبة الهوائية من الأنقباض تحت ضغط الأنسجة المحيطة. وتتفـرع القصبـة الهوائية الى شعبة (Bronchus) يمنى وأخـرى يسـرى، مؤديـة الى الرئـة اليمني والـرئة اليسرى على التوالـي. وتتفـرع كل شعبة بدورها عدة



الشكل ٢١-١٧. قالب لرئتي الانسان. لاحظ نظام التفرع في الجهاز القصبي (بتصريح من معهد التشريح، برن).

مرات (نحو ٢٢ مرة في المتوسط) الى شعيبات صغيرة جدا (Bronchioles) (الشكل ٢١-١٧)، وتقوى جدر تلك الشعب والأفرع الرئيسية للشعيبات بالغضاريف أيضا. وتفتح كل شعيبة في مجموعة من الأكياس الصغيرة تشبه عنقود العنب تسمى حويصلات (Alveoli) (الشكل ٢١-١٨)، وهنا فقط في الحويصلات يحدث تبادل الغازات. ويوجد نحو ٣٠٠ مليون حويصلة في رئتي الأنسان البالغ وهي تكون السطح الكلي اللازم لتبادل الغازات والذي يقدر بنحو ١٦٠ م ٢. وبمقارنة هذه القيمة الهائلة (والتي تعادل تقريبا مساحة ملعب تنس) الى السطح الكلي للجلد في انسان يبلغ في الوزن ١٥٠ رطل والذي يقدر بنحو ٢ متر مربع.

والمساحة السطحية التي تهيؤها الحويصلات كافية لسد إحتياجات الجسم من تبادل الغازات أثناء الراحة والنشاط. وتحت ظروف خاصة، على أية حال، يمكن إقلال مساحة تبادل الغازات في الرئتين بشدة. وعلى سبيل المثال، ينتج عن إصابة الحويصلات (Alveoli) بالفيروس أو البكتيريا بالنيمونيا (Pneumonia) وفي النيمونيا يتجمع الليمف والمخاط في الحويصلات والشعيبات الهوائية ونتيجة لذلك تقل المساحة المعرضة للهواء. وفي الحالات الشديدة، قد يتحول المريض الى اللون الأزرق نتيجة نقص الأوكسجين، تنفس الأوكسجين النقي تحت خيمة خاصة قد ينقذ حياة المريض. والتركيز المتزايد للأوكسجين نتيجة إستنشاقه يتسبب في جعل المساحة الخاصة بتبادل

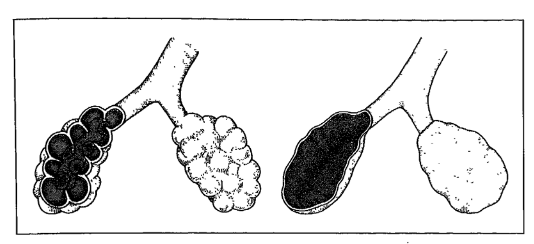


الشكل ٢١-١٨. السطح المقطوع في جزء من رئة فأر كما ترى تحت الميكروسكوب الاليكتروني (المساح). العلامة تدل على مجموعة من الحويصلات. الجدار المتصلب من برونكيد رئوي يمكن مشاهدته ايضا (Br') (أعيد انتاجها بتصريح من كيث، بورتر، ري أ. نونفيل، مقدمة للتركيب الدقيق للخلايا والأنسجة، الطبعة الرابعة، لي، فيبيحر، فيلادليا، ١٩٧٣).

الغازات مهيأة جيدا لذلك.

وهناك مرض أخر في الرئتين يقلل من مساحة تبادل الغازات، وهذا المرض هو الأمفيزيما (Emphysema)، وفي هذا المرض تلتهب وتتكسر كثير من الجدران التي تفصل الحويصلات، ويقلل هذا كثيرا من المساحة اللازمة لتبادل الغازات (الشكل ٢١-١٩) وبعكس النيمونيا، تنشأ حالة الأمفيزيما ببطء جدا ونادرا ما تكون عاملا مباشرا للموت. وعلى أية حال، فالفقد التدريجي لمساحة تبادل الغازات تدفع القلب لضخ كميات اكبر من الدم الى الرئتين للوفاء بحاجة الجسم من تبادل الغازات، وقد يؤدي هذا الجهد الأضافي في أغلب الحالات الى هبوط في القلب.

وتغطى الجدر الداخلية للقصبة الهوائية وفرعيها، وهما الشعبتان الهوائيتان، والفروع الأصغر أي الشعيبات الهوائية جميعها بخلايا طلائية لها أهداب وتفرز المخاط فذرات التراب التي لا ترشح في الخارج عن طريق الأنف يمكن اصطيادها بالمخاط ثم تكنس الأهداب هذه المواد الترابية لأعلى وتطردها الى القصبة الهوائية. وعند قربها من فتحة المزمار، يحدث العطس وتندفع الذرات الترابية الى الفم. أما عن الذرات الصغيرة جدا



الشكل ٢١-١٩. تركيب الحويصلة في رئة طبيعية (يسار) ورئة لضحية إمفيزيما (يمين). تكسر جدر الحويصلات يقلل المنطقة السطحية لتباد الغازات.

و التي تصل الى الحويصلات فيمكن احاطتها وابتلاعها بواسطة الخلايا الأكولة (Phagocytes) الموجودة في جدر الحويصلات. وبعد المعيشة لمدة طويلة في مدينة، (أو تدخين السجائر) فان تجمع مثل تلك المواد يجعل الرئتين غامقتين جدا في مظهرهما.

ولقد أجريت في المدارس العليا والكليات دراسات أثبتت أن قدرة الرئات على التهوية قلت في الطلبة المدخنين، ويكون مسلك الرئة وكأن الفريعات الدقيقة أي الشعيبات الهوائية مسدودة جزئياً. ويحدث هذا اذا ما وجد انتاج اكبر من المخاط في الرئات (ويخرج من رئات مدخنى السجائر بلغم اكثر - وهي حالة معروفة باسم الألتهاب الشعبي الحاد (Chronic bronchitis)، أو إذا ضعف معدل إبعاد المخاط بواسطة الخلايا الهدبية. وأمكن تحديد ذلك بجعل بعض الأفراد تستنشق ايروسولا محتويا على ذرات دقيقة مشعة، ثم تتبع معدل طرد هذه الذرات من الرئات بعداد جيجر كبير، فوجد أن المقاييس في الأشخاص المدخنين حديثا قد انخفضت، ولو أنه لم يلاحظ إنخفاض على مدى بعيد.

ولمحة سريعة الى الجدول الموضح في الشكل (٢١-٢٠) تبين ما يحدث في حالة نموذجية لتركيب الهواء عند وصوله الى الحويصلات، فيذوب بعض الأوكسجين في السائل المرطب للخلايا الطلائية الرقيقة المبطنة للحويصلات ومن هنا ينتشر الأوكسجين في الدم الموجود في الشعيرات الكثيرة الموجود في جدر الحويصلات. وكما في الضفدعة، يتحد أغلب الأوكسجين مع الهيموجلوبين الموجود في كرات الدم الحمراء.

وبالتوالي، ينتشر بعض من ثاني أكسيد الكربون في الدم الى الخارج في الحويصلات، ومنها يمكنه الخروج عن طريق الزفير. وتحمل الدورة الدموية بعد ذلك الأوكسجين لجميع خلايا الجسم، وبحدوث ذلك، يحمل الدم ثاني أكسيد الكربون من تلك الخلايا لأرجاعة ثانية الى الشعيرات الدموية في الحويصلات. وستتم دراسة التفاصيل الأخرى الخاصة بالميكانيكية الكيميائية التي بها يحمل الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون بكفاءة بالدم في الباب الثالث والعشرين.

الشكل (٢١-٢٠): تركيب الهواء الجوى والهواء الخارج من عملية التنفس في انسان نموذجي. لاحظ أن جزءا بسيطا جدا من الأوكسجين المستنشق استهلكه الجسم.

المكونات	الهواء الجوى	الهواء الخارج من عملية التنفس
ن$_٢$ (+ الغازات الساكنة)	٧٨,٦٢	٧٤,٩
أ$_٢$	٢٠,٨٥	١٥,٣
ك أ$_٢$	٠,٠٣	٣,٦
يد$_٢$أ	٠,٥	٦,٢
	١٠٠	١٠٠

ويمكن تفهم السهولة التي يمكن للأوكسجين وثاني أكسيد الكربون أن يمرا بها بين هواء الحويصلات وخلايا كرات الدم الحمراء في الشعيرات الدموية عند اختبار الشكل (٢١-٢١). فيمكن رؤية أجزاء من حويصلتين من أعلى، واحدة الى اليسار والأخرى الى اليمين، وكل جزء مبطن بخلايا طلائية طويلة رقيقة، والفاصل بين الحويصلتين مشغول كلية بشعيرة لاحظ، كذلك، كيف أن الخلية رقيقة وتكون جدار الشعيرة - فيماعدا مكان وجود النواه. والجزء الرمادي الداكن داخل الشعرية هو كرة دم حمراء. وعند أقرب نقطة، يبعد سطحها فقط ٠,٧ ميكرون عن الهواء في الحويصلة، وهو أقل من عشر قطر هذه الخلية الدقيقة.

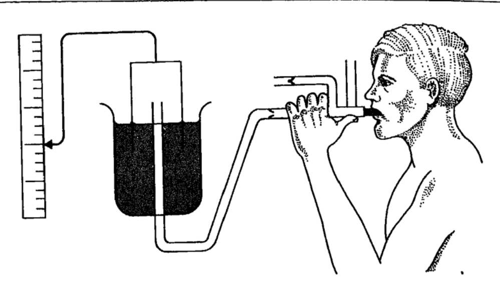


الشكل ٢١-٢١. الحويصلات وشعيرة دموية مجاورة من رئة فأر معمل (X-٥٠٠, ١٠). لاحظ رقة الخلايا الطلائية (Ep) التي تبطن الحويصلات والشعيرات (فيما عدا حيث توجد النواه N) الشيء الرمادي الغامق خلية دموية حمراء (أعيد انتاجها بتصريح من كيث ر. بورتر، ماري أ. بونيفيل، مقدمة للتركيب الدقيق للخلايا والأنسجة، الطبعة الرابعة، لي وفبيجر، فيلادلفيا ١٩٧٣).

٢١-٩. التحكم في التنفس CONTROL OF BREATHING

يختلف المعدل الذي يحدث عنده التنفس (ومعنى ذلك استهلاك الأوكسجين) تبعا لحالة نشاط الجسم، فالتدريبات القاسية قد تزيد بمقدار ٢٠-٢٥ مرة متطلبات الأنسجة للأوكسجين، ويقابل هذه الزيادة في المتطلبات زيادة في معدل وعمق التنفس.

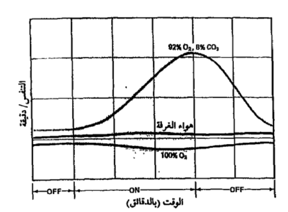
ويكون من المعقول أن نفترض أن نقص الكفاية من الأوكسجين تشعل هذه الإستجابة. ومن السهل أن نبرهن، على أية حال، أن الحرمان من الأوكسجين يلعب دورا صغيرا جدا في تنظيم المعدل الذي تحدث عنده تهوية الرئتين. ويوضح الشكل (٢١-٢٢) تجربة يظهر فيها أنسان يمكنه استنشاق غازات مختلفة ممزوجة فبينما يستنشق هذا الفرد مزيج الغازات، يمكن تسجيل معدل وعمق التنفس بدقة. ويبدأ الفرد التجربة بتنفس هواء نقي (٢١٪ اوكسجين ٠٣, ٠٪ ثاني أكسيد الكربون، نحو ٧٩٪ غازات خاملة بالحجم)، أولا من الحجرة ثم بعد ذلك من الوعاء (Tank). فقد تغير العصبية، والطعم الغير مستساغ المضاف للهواء بواسطة الجهاز، وزيادة مقاومة الهواء في استجابات الفرد، يمكن أخذ هذه التغيرات في الحسبان عند تفسير نتائج مزج الغازات المختلفة.

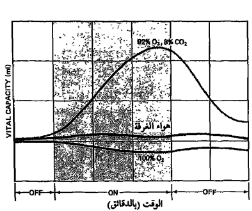


الشكل ٢١-٢٢. جهاز لتحديد تأثيرات مزيج الغازات المختلفة على معدل وعمق التنفس. تستنشق مزيج الغازات من الخزان وتخرج الى الحجرة. حجم الغاز المستنشق يقاس بالمقياس الموجود على اليسار.

والرسمان البيانيان الموضحان في الشكل (٢١-٢٣) يوضحان عدم حدوث أية تغيرات محسوسة في تلك التجربة بالذات، فعند تعويض الهواء بمقدار ١٠٠٪ أوكسجين، لم يحدث أي تغيير محسوس في معدل أو عمق التنفس، ولو أنه يوجد ميل لعمق التنفس في أن يقل بمقدار طفيف. وعند استنشاق الفرد لمزيج من الغازات يتكون من ٩٢٪ اوكسجين، ٨٪ ثاني أكسيد الكربون، فعلى أية حال، يزداد بشدة معدل وعمق حدوث التنفس. لاحظ هنا عدم وجود أنسجة تعاني من نقص الأوكسجين. ويستنشق الفرد مزيجا من الغازات يحتوي على أربعة مرات من الأوكسجين اكثر من الهواء. وتقترح التجربة أن تركيز ثاني أكسيد الكربون يلعب دورا محددا في التحكم في معدل وعمق التنفس.

وأوضحت تجارب فسيولوجية أخرى أن ثاني أكسيد الكربون يحصل على هذا التأثير عن طريق عمله على جزء من المخ هو النخاع المستطيل (الشكل ٢١-١٦)، اذ عندما يمر الدم في الحويصلة، يصبح محتواها من ثاني أكسيد الكربون هو نفس تركيزه في هواء الحويصلة. وبعد دقائق، يصل الدم الى النخاع المستطيل والذي يحتوي على خلايا حساسة جدا لتركيز ثاني أكسيد الكربون في الدم. فاذا ما ارتفعت محتويات ثاني أكسيد الكربون عن الحدود الطبيعية يستجيب النخاع المستطيل لزيادة عدد ومعدل





الشكل ٢١-٢٣. رسمان بيانيان يوضحان تأثير استنشاق هواء الغرفة، ١٠٠٪ أوكسجين، مزيج من ٩٢٪ أوكسجين، ٨٪ ثاني أكسيد الكربون على معدل التنفس (يسار) وعمق التنفس (يمين). ولو أن تركيز الأوكسجين في مزيج ٩٢-٨ يزيد عن أربعة مرات تركيزة في هواء الغرفة، إلا أن وجود ثاني أكسيد الكربون يبدأ الزيادة الكبيرة في معدل وعمق التنفس.

النبضات العصبية التي تتحكم في عمل عضلات بين الضلوع (Intercostal) وكذلك الحجاب الحاجز. والنتيجة هي زيادة في تهوية الرئتين واللتين يتسببان بسرعة في رجوع تركيز ثاني أكسيد الكربون في هواء الحويصلات، ثم في الدم بعد ذلك، الى المستويات الطبيعية.

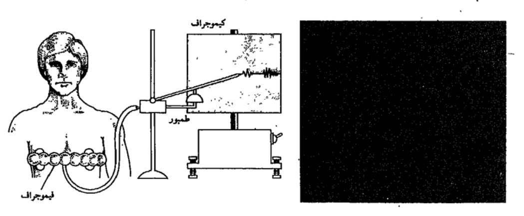
ويوجد تحكم موضعي كذلك لتهوية الرئتين، فالجدر العضلية الملساء للشعيبات الهوائية حساسة جدا لتركيز ثاني أكسيد الكربون. ويسبب ارتفاع مستوي ثاني أكسيد الكربون إتساع الشعيبات الهوائية. وهذا يقلل المقاومة في الممرات الهوائية وبذلك يجعل من الممكن الحصول على اوكسجين اكثر في نفس الوقت الذي تخرج فيه للخارج الكميات الزائدة من ثاني أكسيد الكربون.

وكلنا يعلم أيضا أن معدل وعمق التنفس يوجدان أيضا تحت التحكم الواعي (Con-scious) ولكن هذا التحكم الواعي له حدود معينة، اذ يمكنك أن توقف تنفسك ولكن لمدة محدودة من الزمن، وبالتالي، فان محتويات الدم من ثاني أكسيد الكربون التي تصل الى النخاع المستطيل تصبح عالية لدرجة أن هذا النخاع المستطيل يعبر (Overrides) التحكم الواعي، وهذه هي نقطة الأنكسار (Breaking Point).

ويوضح الشكل (٢١ - ٢٤) تجربة أجريت لدراسة هذا النوع من الأستجابة فحركة صدر الفرد يمكن اكتشافها بانتفاخات (Bellows) مجوفة (النيموجراف

Pneumograph) مربوطة حول الصدر. فتمدد وانبساط الأنتفاخات المذكورة تسببان انخفاض وزيادة ضغط الهواء الداخلي. ويمكن نقل هذه التغيرات في الضغط الى قلم التسجيل الذي يكتب على اسطوانة مدخنة تدور ببطء (والمسماه كيموجراف -Kymog raph). لاحظ أنه بعد مدة من ايقاف التنفس يصبح معدل وعمق التنفس اكبر بكثير عما قبل الفترة التي ابتدأ فيها التنفس عن التوقف. ويمكن تفسير ذلك بزيادة كمية ثاني أكسيد الكربون أثناء فترة ايقاف التنفس. ويمكن زيادة طول الفترة التي يمكن للرجل أو المرأة أن يوقف تنفسه الى نقطة الأنكسار بالتنفس أسرع و أعمق وذلك قبل وقت ايقاف التنفس. فالتهوية الشديدة القوية تقلل من محتويات ثاني أكسيد الكربون في هواء الحويصلات والدم الى ما دون قيمته العادية، ويستلزم ذلك وقتا اكبر لمحتويات ثاني أكسيد الكربون كي تزيد ثانية لتصل الى نقطة الأنكسار. فاذا ما تنفس الفرد ببساطة طبيعيا بعد فترة من التنفس الشديد الزائد (التهوية الزائدة -Hyper ventilation) فاننا نجد أن أن عمق التنفس يصبح بوضوح أقل منه في الفترة التي سبقت التهوية الزائدة.

ويعتبر النخاع المستطيل، عندئذ، ميكانيكية فعالة في التحكم في محتويات الدم من ثاني أكسيد الكربون. فأي زيادة في ثاني أكسيد الكربون سرعان ما تقل بسرعة وذلك بزيادة تهوية الرئتين، فالنخاع المستطيل عندئذ هو أحد أجهزة الهوميوستاتيكية الهامة في الجسم فمن خلال نشاطه تبقى محتويات الدم من ثاني اكسيد الكربون في معدلاتها في



الشكل ٢١-٢٤. تشغيل النيموجراف. حركات تنفس الفرد تنقل الى المؤشر وتسجل على اسطوانة دائرة (الكيموجراف). سجلات الكيموجراف توضح التأثير على معدل وعمق التنفس في (١) امساك التنفس، (٢) زيادة التهوية (٣) زيادة التهوية التي يتبعها امساك التنفس. والنتائج في كل حالة تعكس تركيز ثاني أكسيد الكربون في الدم عند نهاية كل نشاط.

حدود ضيقة جدا وكنتيجة لذلك، فان استمرارية البيئة الداخلية بالنسبة الى محتوياتها من ثاني اكسيد الكربون يتم الحفاظ عليها في معدلاتها الثابتة.

ويبدو غريبا أن المعدل الذي يتنفس عليه المرء، ويمد بذلك الجسم بالأوكسجين، يتحكم فيه محتويات الدم من ثاني أكسيد الكربون بدلا من محتويات الدم من الأوكسجين. ولعلك تذكر أن تكسر الجلوكوز بالتنفس الخلوي ينتج عنه ثاني أكسيد الكربون بنفس السرعة التي يستنفذ بها الأوكسجين. وتحتاج عضلات الجسم إلى كميات زائدة من الأوكسجين أثناء التدريب الشاق، ولكنها أي العضلات تنتج كميات زائدة من ثاني أكسيد الكربون في نفس الوقت، وهذا يعطي الشرارة للتهوية الزائدة للرئتين وبالتالي إمداد كميات اكبر من الأوكسجين الذي يحتاج اليه الجسم أوتوماتيكيا.

وهناك موقف واحد نجد فيه أنفسنا نعاني من نقص في الأوكسجين بدون زيادة مقابلة في انتاج ثاني أكسيد الكربون. فعندما نطير (في طائرة غير مكيف ضغط الهواء بها) الى ارتفاع أعلى من ١٣,٠٠٠ قدم، نبدأ في المعاناه بسبب نقص الأوكسجين. وبانخفاض كميات الأوكسجين اللازمة للتنفس الخلوي يوجد على أية حال، نقص مماثل في كمية ثاني أكسيد الكربون. ونتيجة لذلك لايحدث تنبيه للنخاع الشوكي كي يرفع من معدل تهوية الرئتين. ولحسن الحظ، لايمتلك الجسم الميكانيكية التي يمكن بها مواءمة مثل هذه الحالة. وتوجد مستقبلات في الاورطة والشرايين السباتية (Carotoid arteries) تكتشف المستويات المنخفضة من الأوكسجين في الدم، وترسل تلك المستقبلات النبضات للنخاع المستطيل وتنبهه كي يزيد من معدل تهوية الرئتين. ولو أن هذه الزيادة في معدل وعمق التنفس ليست كبيرة كتلك التي تسببها الزيادة في ثاني أكسيد الكربون، إلا إنها تتسبب في زيادة كميات الأوكسجين الواردة الى الحويصلات.

٢١-١٠. الصحة وتلوث الهواء AIR POLLUTION AND HEALTH

يمدنا سطح الحويصلات باتصال داخلي كبير وقوي بين البيئة الداخلية والهواء، وفي مدة أربعة وعشرين ساعة، نتنفس ١٥,٠٠٠ لترا من الهواء، أصبح نقاء هذا الهواء من الأهمية بمكان.

ولقد وجد عدد من المواد طريقه إلى الهواء، أساسا نتيجة نشاط الأنسان، قد

تعتبر هذه المواد ملوثات للهواء . وتختلف مصادر تلوث الهواء كثيراً ولكن يمكن تقسيمها الى مجموعتين: أحدهما نشاطنا الصناعي والتكنولوجي ، فمعامل تكرير البترول، مصانع سبك المعادن (الشكل ٢١-٢٥)، مصانع توليد الكهرباء (بحرق الوقود) والسيارات ، كلها تنتج كمياتٍ هائلة من الملوثات في الهواء وتشمل هذه الملوثات ما يلي :

١ ــ الهباب (من الوقود الغير محترق) وذرات المصانع من أشكال مختلفة

٢ ــ ثاني أكسيد الكبريت (كب أ$_{٢}$) من تأكسد الوقود (مثل الفحم، الزيت) الذي يحتوي على مركبات الكبريت.

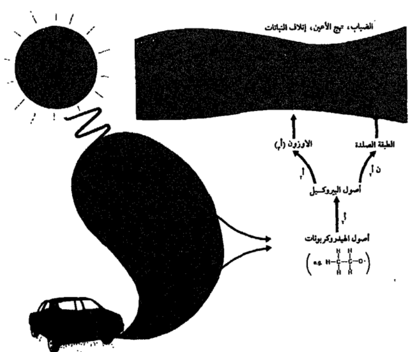
٣ ــ هيدروكربونات مختلفة (من الأشتعال الغير كامل للجازولين)، ومن تلك المواد البنزوبيرين وهي مادة مسببة للسرطان.

٤ ــ أكاسيد النتروجين (مثل ن أ$_{٢}$) الناتجة بالأتحاد الكيميائي للأوكسجين (أ$_{٢}$) والنتروجين (ن$_{٢}$) (في اسطوانات ماكينات الإحتراق الداخلي).

٥ ــ أول أكسيد الكربون (ك أ) من الإحتراق الغير كامل لمواد الوقود. وفي ضوء الشمس الساطع ، تتفاعل أكاسيد النيتروجين، الهيدروكربونات ، الأوكسجين



الشكل ٢١-٢٥ . حوض نحاس، ولاية تنيسي. قتلت المزروعات في تلك المنطقة بالحرق المتعمد وبتلوث الهواء من صهر النحاس قبل عام ١٩٠٧ . وبعد اكثر من نصف قرن فالتعرية المستمرة مازالت تعرقل محاولات اعادة التشجير. متوسط سقوط الأمطار أقل والحرارة أعلى من المناطق المحيطة (بتصريح من مصلحة الغابات الأمريكية).



الشكل ٢١-٢٦ . أمثلة لتفاعلات تؤدي الى تكوين هباب كيميائي ضوئي . الأصول هي ذرات أو جزيئات باليكترونات غير مزدوجة . وهي شديدة التفاعل كيميائيا. PAN هو بيروكس أسيتايل نيترات.

كيميـائيـاً لانتاج أكاسيد قوية مثل الأوزون (أ ٣) ونترات البيروكسين أسيتايل (PAN) (الشكـل ٢١-٢٦) وتتلف هذه الملوثـات الثانوية بشدة الحياة النباتية وتؤدي الى تكـوين الهبـاب (Smog) كالنـوع المـوجود في مدينة لوس أنجليس الأمـريكية، تعتـبر مادة (PAN) مسئـولـة أساسا عن تهيج الأعين والمميز عند التعرض لهذا النوع من الهباب.

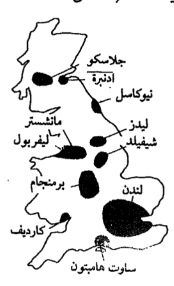
المجموعة الثانية المسببة لتلوث الهواء هي تدخين السجائر (السيجار والغليون غالبا لا يدخل دخانها الجسم، وعلى ذلك فان تركيز دخانها الذي يصل الى الرئتين لايكون مرتفعا كما في دخان السجائر)، ويحتوي دخان السجائر على عدد من الهيدروكربونات، ومنها البنزوبيرين.

فهل توفر الحماية الميكانيكية التي تعمل في الرئتين الحماية الكافية من تلوث الهواء؟ ليس من السهل الأجابة على هذا السؤال ولكن الأتجاه الذي يدعو الى الأمل لتلك الأجابة ظهر من دراسات بحث فيها معدل الأمراض في أفراد اختلفت طرق تعرضهم

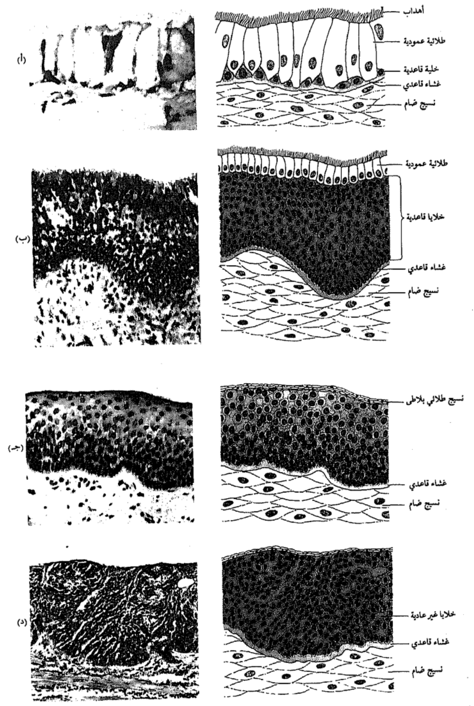
للملوثات الهوائية. ويوضح الشكل (٢١-٢٧) أن معدل سرطان الرئة في بريطانيا أعلى في مناطق المدن حيث توجد الصناعات الثقيلة. ولسوء الحظ، فانه من الصعب تفسير المعلومات من هذا النوع لأن سكان المدن يعتبرون كذلك من المدخنين بكثرة للسجائر اكثر من أقاربهم سكان الريف.

وبالرغم من ذلك، تتجمع دائما معلومات اكثر و اكثر، وأصبح واضحا أنه توجد أمراض في الأنسان اكثر انتشارا في الأفراد المعرضين لتلوث الهواء في حياة المدينة أو في الأفراد الذي يستنشقون الهواء الملوث بدخان السجائر (أو، خاصة، الأثنين معا). وتشمل هذه الأمراض الألتهابات الرئوية الحادة (Chronic Bronchitis) (أو ما يشبهها مثل الأمفيزيما) و الأزما (Asthma) ومشاكل في الجهاز الدوري وسرطان الرئة. وفي الحقيقة، اذا ما حلل الأنسان معدل الوفيات من جميع الحالات في ذكور الولايات المتحدة الأمريكية، فان هذا المعدل يتناسب نسبيا مع (أ) عدد السجائر التي يدخنها الأفراد يوميا، (ب) عمق دخول دخان السجائر بالجسم، (ج) عدد السنين منذ بدء التدخين. ولحسن الحظ، فان النتائج تبدو عكسية الأن، إذ أن المعدل الكلي للموت بين المدخنين يتناسب عكسيا مع الزمن الذي مضى منذ ترك المدخن لعادة التدخين.

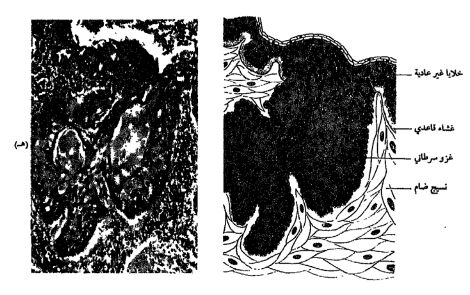
وينشأ عن الألتهاب المزمن للخلايا الطلائية للشعب الرئوية تغيرات خلوية متعددة، ومن تلك التغيرات سمك الطبقة الطلائية، وفقد الخلايا الهدبية، وظهور خلايا بها أنوية شاذة (الشكل ٢١-٢٨). وأظهرت الدراسات أن مدى هذه التغيرات مرتبط



الشكل ٢١-٢٧. مناطق الموت فيها فوق المتوسط بسبب سرطان الجهاز التنفسي (القصبات، الشعب الرئات) في انجلترا، اسكتلندة، ويلز.



الشكل ٢١-٢٨. صورة فوتوغرافية دقيقة لـ (١) النسيج الطلائي للشعب (مكبرة جدا)، ب، ج، د،) ثلاثة أطوار من التغيرات الغير طبيعية في الخلايا الطلائية للشعب والمعروف وجودها في المدخنين، (هـ) سرطان الرئة. يوضح الرسم الترتيب الخلوي الموجود في كل طور. (الصور الدقيقة بتصريح من أوسكار أورباخ، م.د.).



تابع الشكل ٢١-٢٨. تكملة.

بكمية السجائر التي يدخنها الفرد. فالخلايا ذات الأنوية الشاذة، ربما تكون هي الخلايا التي تسبق ظهور السرطان بها (Precancerous)، تكون نادرة في الأفراد الغير مدخنين ولا يزداد عددها مع تقدم العمر. وعلى العكس من ذلك ففي الأفراد المدخنين، تكثر الخلايا الطلائية بأنويتها الشاذة وتزداد مع ازدياد سنى التدخين ولحسن الحظ، يقل عدد هذه الخلايا ببطء عند الأمتناع عن التدخين.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تستخدم الغالبية العظمى من الكائنات الأوكسجين كمستقبل اليكتروني نهائي في التنفس وتنتج ك أ٢ كناتج من عملية التنفس. ونشاط الخلية، النسيج أو الكائن، لدرجة كبيرة محدد بالمعدل الذي يمكنها به أن تتبادل غازي الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون مع البيئات المحيطة بها.

ويحدث تبادل الغازات بين الخلايا، بين (ECF) عن طريق الأنتشار. والكائنات وحيدة الخلية وكذلك خلايا بعض الكائنات الصغيرة عديدة الخلايا قريبة بدرجة كافية للبيئة التي تعيش فيها حيث يقوم الأنتشار بمفرده بتزويد احتياجاتها من تبادل الغازات. أما الكائنات الكبيرة عديدة الخلايا فلديها ملاءمة تجعل الخلايا العميقة بها تتبادل الغازات مع البيئة. ولقد وجد اقتراحان لذلك:

(١) بعض الكائنات، مثل النباتات والحشرات، يكون تركيبها بحيث لا تبعد أي خلية عن جهاز مكون من قنوات مملوءة بالهواء وهذا الجهاز متصل بالجو.

(٢) كثير من الحيوانات - كل الفقاريات، على سبيل المثال- لها أعضاء خاصة لتبادل الغازات بين البيئة وبين جهاز دورى مملوء بالدم، وتزود هذه الأعضاء الدم بـ $أ_٢$ من الـدم، ويوزع الدم بدورة $أ_٢$ الى جميع خلايا الجسم ويبعد ك $أ_٢$ منها.

وفي الثدييات، تحدث تهوية الرئتين بحركة القفص الضلعي والحجاب الحاجز، وينظم معدل وعمق التنفس مستوي ك $أ_٢$ في الدم.

وتوجد ميكانيكية للتنظيف في الرئات والتي تحميها من المواد الضارة الموجودة في الهواء. وعلى أية حال، فهذه الميكانيكية يمكن التغلب عليها والا أصيب الأنسان بأمراض خطيرة مثل التهاب الشعب المزمن، الأمفيزيما وسرطان الرئة.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ تتبع الممر الذي تأخذه جزيئات الأوكسجين من وقت دخوله من فتحة الأنف الى أن يدخل خلية كرة دموية حمراء.

٢ ــ كيف تحسن الزواحف، الطيور، الثدييات كفاءة تهوية رئاتها أكثر مما تفعله البرمائيات؟

٣ ــ كيف تعوض البرمائيات كفاءتها المنخفضة في تهوية الرئتين؟

٤ ــ يتعارض انشاء الطرق السريعة دائما مع الصرف الطبيعي للمياه، متسبباً بذلك في تجمع المياه في غابات كانت من قبل حسنة الصرف، وسرعان ما ترى أشجارا ميتة في تلك المناطق. علل ذلك.

٥ ــ لماذا تعتبر الخياشيم ضعيفة الملاءمة للمعيشة على اليابسة؟

المراجع REFERENCES

1- WIGGLESWORTH, SIR VINCENT, Insect Respiration, Oxford Biology Readers, No. 48, Oxford University Press, Oxford, 1972.

2- SCHMIDT - NIELESN, K., "How Birds Breathe," Scientific American, Offprint No. 1238, December, 1971.

3- HAMMOND, E. C., "The Effects of Smoking," Scientific American, Offprint No. 126, July, 1962. Includes a description of the functional and structural changes of the bronchi and alveoli in smokers.

4- LAVE, L. B., and E. P. SESKIN, "Air Poluution and Human Health," Science, Reprint No. 39, August 21, 1970. A comprehensive review of the various studies that have been made.

5- HUGHES, G.M., The Vertebrate Lung, Oxford Biology Readers, No.. 59, Oxford University Press,. Oxford, 1973.

6- HEATH, O. V. S., Stomata, Oxford Biology Readers, No. 37, Oxford University Press, Oxford, 1972.



CHAPTER 22 الباب الثاني والعشرون

انتقال المواد في النباتات الوعائية

THE TRANSPORT OF MATERIALS IN VASCULAR PLANTS

الباب الثاني والعشرون

انتقال المواد في النباتات الوعائية

٢٢-١ . الأهميـــة IMPORTANCE

النباتات أيضاً تواجه مشكلة نقل المواد خلال أجسامها. مشكلة الأمداد من وإلى الأنسجة الداخلية ليست حادة في النباتات كما هي في الحيوانات وكما سوف نرى فإن الأنسجـة الحية في النبات تكون عادة قريبة من السطح. الحاجة الحقيقية إلى جهاز للنقل تنشأ بسبب الورطة التي تجد النباتات الأرضية نفسها فيها. فالنبات لا يستطيع القيام بالبنـاء الضـوئي بدون الماء وضوء الشمس وهو يؤمن احتياجاته المائية بإرسال مجموع جذري في التربة كما يؤمن احتياجاته من الضوء بتعريض أوراقه في الهواء وكلما ازداد نجاحة في تعريض أوراقه للضوء فوق النباتات المنافسة كلما ابتعد بهم عن مصادر الماء في التربة ويكـون محتاجـا إلى جهاز كفء للنقل لسد الفجوة ونقل الماء بسرعة من الجذور إلى الأوراق. جهاز النقل مطلوب أيضاً لضمان نقل الغذاء بكفاءة من الأوراق إلى الخلايا الحية في الساق والجذور من أجل اشباع متطلباتهم الغذائية اللازمة للأيض والنمو.

نقـل المـواد في النباتات يسمى الأنتقال Translocation وهو يحدث في جهاز خاص من الأوعية الناقلة. هذه توجد في مجموعات تسمى الحزم الوعائية vascular bundles تمتد خلال كل أعضاء جسم النبات - الجذر، الساق، الورقة (في العروق) والـزهرة - بحيث يتم الأنتقال بين الأعضاء بسرعة وكفاءة. في الحزم الوعائية يوجد نوعان متميزان من الأنسجة: الخشب والحاء.

٢٢-٢ . الخشب XYLEM

أهم أجزاء الخشب في النباتات الزهرية هي الأوعية Vessels (الشكل ٢٢-١) وهي عبارة عن أنابيب ذات جدر مغلظة تمتد رأسيا لعدة أقدام من نسيج الخشب. ويتراوح قطرها ما بين ٢٠ ميكرون فقط إلى حوالي ٧٠٠ ميكرون (٧, ٠مم) بحسب الموقع والنوع النباتي الذي توجد فيه. جدر أوعية الخشب تكون مغلظة بترسبات ثانوية من السيليلوز وعادة تزداد صلابتها بوجود مادة لاصقة هي اللجنين lignin . لاتترسب الجدر الثانوية في الخشب بالتساوي ولكن على شكل حلزونات أو حلقات . . . . الخ . وقد تكون جدر الأوعية مثقبة بالنقر pits.

تنشأ أوعية الخشب من خلايا مفردة أسطوانية عادة تكون مرتبة بحيث تتلاقى أطرافها وعند إكتمال نضجها تذوب الجدر الطرفية لهذه الخلايا وتموت المحتويات السيتوبلازمية وتكون النتيجة هي تكوين الوعاء الخشبي على هيئة قناة متصلة وميتة. وظيفة الأوعية الخشبية هي نقل الماء والأملاح المعدنية إلى أعلى.

توجد في نسيج الخشب كذلك قصيبات tracheids و هي عبارة عن خلايا مفردة قطرها حوالي ٣٠ ميكرون ويبلغ طولها عدة ميللمترات. في القطاع العرضي يمكن تمييزها عن الأوعية بواسطة جدرها المضلعة وفي كثير من الأحيان بواسطة حجمها الأصغر. أطرافها مستدقة وتتراكب الأطراف المستدقة للخلايا المتجاورة. وكما في أوعية الخشب فان للقصيبات جدر مغلظة ملجننة وعند اكتمال نضجها لا يوجد بها سيتوبلازم جدرها مثقبة بحيث يستطيع الماء والأملاح الذائبة أن تنساب من قصيبة إلى أخرى بسهولة ومثل أوعية الخشب تقوم القصيبات بنقل الماء والأملاح المعدنية إلى أعلى خلال الحزم الوعائية. في السرخسيات والمخروطيات تكون القصيبات هي القنوات الوحيدة لنقل الماء اذ لا يوجد بها أوعية.

٢٢-٣ . اللحاء PHLOEM

أوعية النقل الأساسية في اللحاء هي الأنابيب الغربالية Sieve Tubes هذه تتكون من خلايا أسطوانية (قطرها حوالي ٢٥ ميكرون وطولها ١٠٠-٥٠٠ ميكرون) مرتبة بحيث تتلاقى أطرافها. الجدر الطرفية لخلايا الأنابيب الغربالية البالغة تكون مثقبة

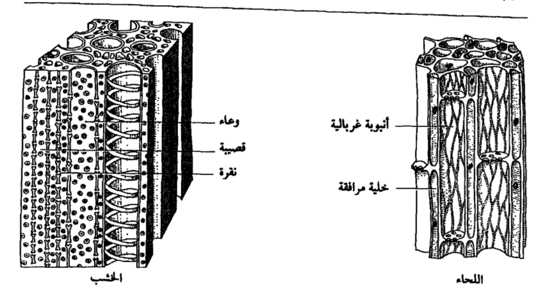
فتسمح للخيوط السيتوبلازمية بالأمتداد بين الخلايا المتجاورة. مظهر هذه الجدر الطرفية تحت المجهر هو السبب في تسميتهم بالصفائح الغربالية Sieve plates (الشكل ٢٢-١). وكما في حالة أوعية الخشب والقصيبات فان الأنابيب الغربالية تشكل قنوات متصلة تمتد من قاع النبات حتى قمته.

تختلف الأنابيب الغربالية عن أوعية الخشب والقصيبات من حيث أن الخلايا التي تتكون منها لا تفقد السيتوبلازم عند نضجها ولكنها مع ذلك تفقد أنويتها. في معظم النباتات تقع خلايا الأنابيب الغربالية بجوار خلايا مرافقة Companion Cells (الشكل ٢٢-١) وهذه تحتفظ بأنويتها عند النضج وربما مارست بعض التحكم في نشاطات خلايا الأنابيب الغربالية. خيوط دقيقة من السيتوبلازم تسمى الروابط البلازمية plasmodesmata تربط سيتوبلازم الأنابيب الغربالية بسيتوبلازم الخلايا المرافقة.

الخشب واللحاء يكونان معا الحزم الوعائية في النبات. ترتيب الخشب واللحاء يختلف في الجذور والسوق وعروق الأوراق. بل ان ترتيب الحزم الوعائية في داخل العضو الواحد يختلف كثيرا من نوع نباتي Species إلى آخر. في دراستنا للتركيب الداخلي سوف نقتصر بالضرورة على أنواع قليلة فقط.

هناك قسمان رئيسيان من النباتات الزهرية: ذوات الفلقتين dicotyledons (أو إختصاراً dicots) وذوات الفلقة الواحدة monocotyledons (أو إختصاراً monocots) هذه الأسماء مستمدة من وجود مستودعين للغذاء (أو فلقتين) في بذور نباتات المجموعة الأولى أو مستودع غذائي واحد في بذور الثانية. تضم ذوات الفلقتين تشكيلة واسعة من النباتات فأصناف القرنبيط والبقوليات والصباريات والطماطم والدردار elm والبلوط والقيقب maple ليست إلا أمثلة قليلة من الأصناف والأنواع العديدة من ذوات الفلقتين. أما ذوات الفلقة الواحدة فتضم الزنابق والنخيل والأركيد والتيوليب والبصل وكل النجيليات. النجيليات بدورها تشمل الذرة والقمح والأرز وكل محاصيل الحبوب الأخرى التي نعتمد عليها كثيرا في غذائنا.

تختلف ذوات الفلقة الواحدة عن ذوات الفلقتين في عدد من الصفات الأخرى غير تركيب البذور. إحدى هذه الصفات هي ترتيب الأنسجة الوعائية. بقية الأختلافات سوف نتعرض لها في الباب الخامس والثلاثين.



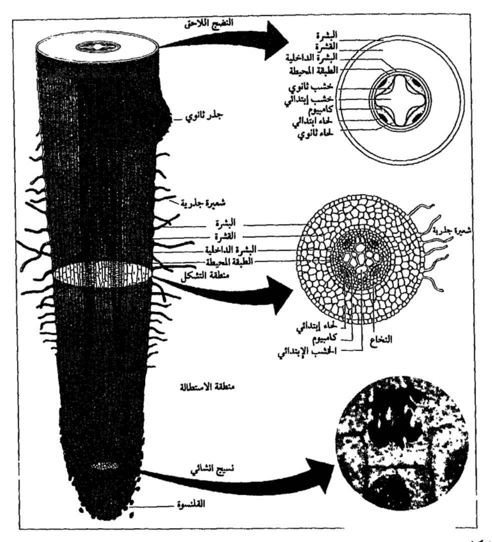
الشكل ٢٢-١. الأنسجة الوعائية. أوعية الخشب والقصيبات (إلى اليسار) لاتحتوي على سيتوبلازم عند اكتمال تكوينها.

٢٢-٤. تركيب الجذر: THE ORGANIZATION OF THE ROOT

الشكل ٢٢-٢ يوضح التركيب النموذجي لجذر حديث من ذوات الفلقتين. في القمة يوجد نسيج انشائي meristem تنشأ منه تراكيب الجذر الأول (الأبتدائي). الأنقسام غير المباشر في هذا النسيج الأنشائي يزيد من طول الجذر وبسبب كثرة حدوث الأنقسام غير المباشر في هذه المنطقة الجنينة فان قمم الجذور تستخدم كثيرا لتدريس هذا النوع من انقسام الخلية. تقوم القلنسوة root cap بحماية هذا النسيج الأنشائي من التهتك نتيجة الأحتكاك بحبيبات التربة.

بمجرد نشأة الخلايا من النسيج الأنشائي فانها تمر بفترة استطالة والمنطقة التي يحدث فيها ذلك تسمى منطقة الأستطالة region of elongation و بمجرد أن تكتمل استطالة خلايا الجذر فانها تبدأ عملية التشكل differentiation والتشكل يتضمن نشأة تراكيب متخصصة. الخلايا القريبة من سطح الجذر تتشكل لتكوين خلايا البشرة epidermis ومعظم هذه تحدث بها إمتدادات للجدار هي الشعيرات الجذرية root hairs وهي تزيد كثيرا من مساحة سطح الجذر كما أنها المداخل الرئيسية للماء.

في داخل البشرة تنشأ حلقة (كما ترى في المقطع العرضي) من خلايا برانشيمية تسمى



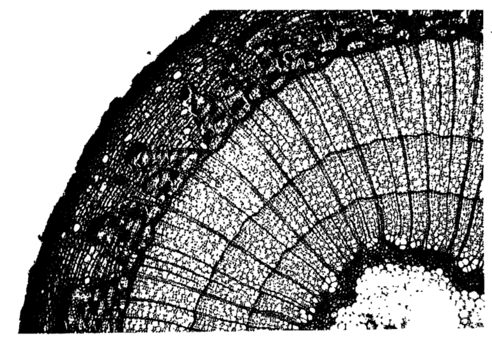
الشكل ٢٢-٢. تركيب جذر حديث لنبات من ذوات الفلقتين في قطاع طولى (إلى اليسار) وفي قطاعات عرضية (إلى اليمين). تم تقصير القطاع الطولى لتوضيح كل مراحل نمو الجذر. (الصورة بتصريح من ترتوكس).

القشرة Cortex. تعمل القشرة كمنطقة لتخزين الغذاء ويحدها من الداخل طبقة واحدة من الخلايا هي البشرة الداخلية endodermis في داخل البشرة الداخلية توجد الأسطوانة المركزية التي تحتوي على الحزم الوعائية. يحيط بالأسطوانة المركزية طبقة محيطية pericycle تنشأ منها أفرع الجذور (أو الجذور الثانوية). في داخل الطبقة المحيطية للجذر الحديث يوجد نسيج الخشب ونسيج اللحاء وخلايا برانشيمية تسمى النخاع pith. يترتب نسيج الخشب في حزم قطرية radial ويتبادل معه نسيج اللحاء (الشكل ٢٢-٢).

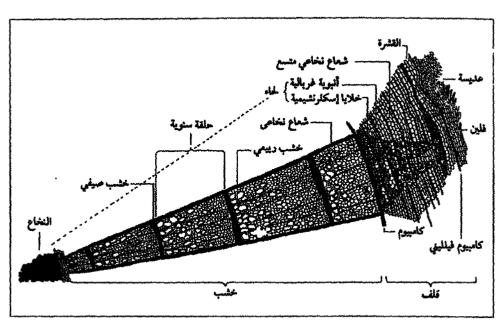
الحزم الوعائية الموجودة في الساق ليست إلا امتداد للحزم الموجودة في الجذر ولكنها مع ذلك تأخذ ترتيبا مختلفا. كذلك تكون الحزم الوعائية في سوق ذوات الفلقة الواحدة مرتبة بصورة مختلفة تماما عما هو موجود في سوق ذوات الفلقتين (ترتيب الأنسجة في جذور ذوات الفلقة وذوات الفلقتين متشابه إلى حد كبير). وحتى فيما بين ذوات الفلقتين فان ترتيب الأنسجة في ذوات السوق الخشبية (النباتات المعمرة perennials) يختلف بعض الشيء عنه في ذوات السوق العشبية (الحوليات annuals).

٢٢-٥. الساق الخشبية لذوات الفلقتين: THE WOODY DICOT STEM

القطاع العرضي في ساق حديثة لشجرة التيوليب *(Liriodendron tulipifera)* هو مثال جيد لترتيب الأنسجة في الساق الخشبية لنبات من ذوات الفلقتين (الشكل ٢٢-٣). يتكون الساق من ثلاث مناطق متميزة هي القلف bark والخشب wood والنخاع pith. المسطح الخارجي للقلف تحميه طبقات من خلايا الفلين cork الميتة والتي يوجد بها السيوبرين suberin والسيوبرين عبارة عن مادة شمعية تقلل كثيرا من فقد الماء من الساق. يوجد العديد من فتحات العديسات lenticels في الفلين وعن طريق هذه



الشكل ٢٢-٣. الحلقات السنوية في خشب نبات شجرة التيوليب او الحور الأصفر. كم كان عمر هذا الفرع عند قطعة؟ (بتصريح من جورج س. المور).



الشكل ٢٢-٤ . التركيب النموذجي لساق خشبي من ذوات الفلقتين. حزمة وعائية مفردة من ساق الزيزفون *Tilia* مبينة في قطاع عرضي.

الفتحات يتم تبادل الأكسجين وثاني أوكسيد الكربون بين أنسجة الساق والهواء الجوي. يوجد تحت الفلين طبقات من الخلايا البرانشيمية تتكون منها القشرة Cortex هذه الخلايا تختزن الغذاء في الساق تماماً كما تفعل في الجذر. في الساق الحديثة جدا (قبل تكوين الفلين) قد يوجد بها بلاستيدات خضر وحينئذ يمكنها القيام بالبناء الضوئي. في الساق الأكبر عمرا ينشأ نسيج إنشائي بين القشرة والفلين ويعمل الأنقسام غير المباشر في هذا النسيج الأنشائي (الكمبيوم الفليني cork cambium) على إحلال خلايا فلينية محل تلك التي تفقد بالتعرض للجو (الشكل ٢٢-٤).

الجزء الداخلي من القلف يتميز بوجود مساحات متبادلة من نسيج اللحاء والخلايا البرانشيمية. وتوجد الخلايا البراشيمية عند أطراف الأشعة rays الأفقية التي تمتد بين النخاع والقلف . هذه الأشعة تؤدى وظيفة النقل الجانبي lateral transport للمواد بين المنطقتين. الجزء المتسع منها في القلف يعمل كذلك كمستودع للغذاء. نسيج اللحاء يتركب من حزم من الأنابيب الغربالية محاطة ومدعمة بخلايا إسكلرنشيمية Sclerenchyma.

الحد الداخلي لمنطقة القلف يتميز بوجود نسيج هو الكامبيوم Cambium وكنتيجة

لنشاطه يتكون لحاء جديد باستمرار في منطقة القلف أثناء موسم النمو. وينتج الكامبيوم أيضا خشب جديد نحو الداخل.

الخشب xylem يكون منطقة الخشب wood . أوعية الخشب التي تتكون أثناء موسم الربيع وحينما يكون الماء متوفر بكثرة تكون أكثر إتساعا من الأوعية التي تتكون أثناء موسم الصيف. وخلال موسم الكمون لايتكون خشب بالمرة. الفارق المرئى بين الخشب الصيفى في إحدى السنين والخشب الربيعي للسنة التالية يساعدنا على عد الحلقات السنوية annual rings . الشريط الخشبي الكامل الذي يتكون في موسم نمو واحد يشكل حلقة سنوية واحدة.

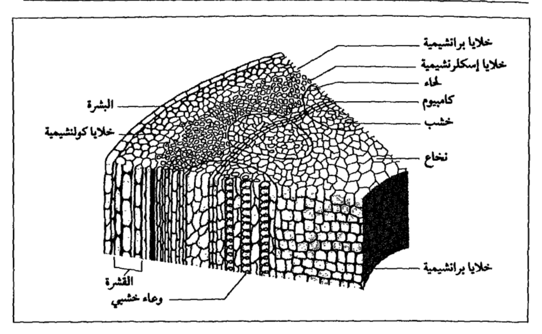
يؤدي الخشب وظيفة مزدوجة: التدعيم والنقل. في السوق المسنة تشارك إحدى الحلقات الخشبية في نقل المواد وهذه تسمى بالخشب العصيري sapwood أما الحقات الداخلية من الخشب فتتوقف عن أداء وظيفة النقل ولكنها تمد الشجرة بتدعيم متزايد. هذا الجزء من الخشب هو الخشب الصميمي heart-wood.

في الأجزاء الداخلية من الساق الحديثة يوجد النخاع وهو يحتوي على خلايا برانشيمية تعمل كمناطق لتخزين الغذاء. في السوق الخشبية المسنة يختفي النخاع.

٢-٦ . الساق العشبية لذوات الفلقتين: THE HERBACIOUS DICOT STEM

التركيب الأساسي للساق العشبية في ذوات الفلقتين (الشكل ٢٢-٥) يشبه تركيب الساق الخشبية لذوات الفلقتين إلا أن سطح الساق تحمية فقط طبقة من البشرة وليس الفلين. ويوجد تحت البشرة خلايا القشرة وهي غالبا تحتوي على بلاستيدات خضر وتقوم بالبناء الضوئي. الجزء الداخلي من الساق يكون معبأ بخلايا برانشيمية هي النخاع أما الأجزاء الخارجية من الحزم الوعائية فتحتوي على نسيج اللحاء مثلما كان الحال في السوق الخشبية لذوات الفلقتين. على الجانب الداخلي ينفصل اللحاء عن الخشب بنسيج الكامبيوم. على الرغم من أن الكامبيوم ينتج لحاء وخشب إضافيين أثناء موسم النمو إلا أنه لا تتكون حلقات سنوية.

وكما يدل الاسم فان السوق العشبية لذوات الفلقتين لا تكون لها نفس قوة وصلابة السوق الخشبية لذوات الفلقتين وذلك لعدم وجود حلقات خشبية ولكن الساق تتلقى



الشكل ٢٢-٥. التركيب التشريحي النموذجي لساق عشبية من ذوات الفلقتين. لماذا لاتوجد حلقات سنوية؟

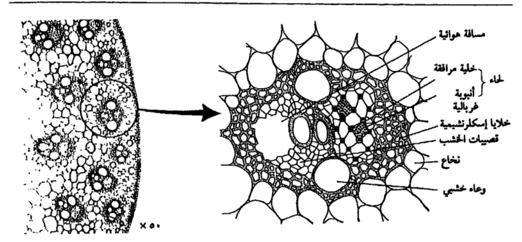
بعض التدعيم من تجمعات الخلايا الأسكلرنشيمية الموجودة بين اللحاء والقشرة.

٢٢-٧. ساق ذوات الفلقة الواحدة THE MONOCOT STEM

تركيب الساق في ذوات الفلقة الواحدة تختلف تماماً عنه في ذوات الفلقتين. القطاع العرضي في ساق الذرة *(Zea maus)* (الشكل ٢٢-٦) يبين هذه الأختلافات بوضوح. تتركب ساق الذرة من حلقة خارجية وجزء داخلي محشو بالنخاع أما الحلقة الخارجية فانها تمد الساق بمعظم التدعيم وتنتشر الحزم الوعائية عشوائيا في النخاع. وهي تبدو في المقطع العرضي كرسم كاريكاتيري لوجه إنسان. تحيط بكل حزمة طبقة من خلايا سكلرنشيمية تدعم الخلايا الموجودة بداخلها ويوجد اللحاء في منطقة الجبهة. الفحص الدقيق يكشف عن وجود خلايا مرافقة بين الأنابيب الغربالية. يوجد بالحزمة أربعة أوعية خشبية تكون فيما بينها العينين و الأنف. معظم محيط الوعاء السفلي يلامسه الهواء الموجود في فجوة هوائية. قصيبات الخشب توجد في منطقة الخد.

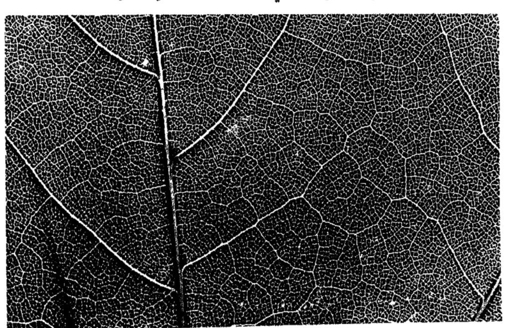
٢٢-٨. عروق الورقة : THE LEAF VEINS

الحزم الوعائية في الأوراق هي امتدادات مباشرة للحزم الوعائية الموجودة في الساق.

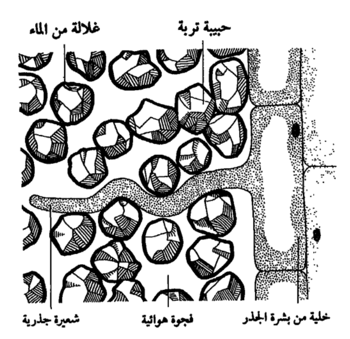


الشكل ٢٢-٦. التركيب النموذجي لساق نبات من ذوات الفلقة الواحدة. إلى اليمين تفاصيل حزمة وعائية مفردة. (الصورة بتصريح من تيرتوكس).

وهي تمر من الساق إلى الورقة إلى العروق المختلفة في الورقة وهذه تتفرع إلى عروق متزايدة الدقة (الشكل ٢٢-٧) ربما لا توجد خلية في النسيج الأسفنجي للورقة تبعد اكثر من خليتين عن نهاية أحد العروق. الخشب واللحاء في أحد العروق (الشكل ٨-١٢) غالبا تحيط بها طبقات من الخلايا الأسكرنشيمية التي تدعم العروق. والعروق بدورها تعمل كهيكل تدعيمي للأنسجة الرخوة في نصل الورقة.



الشكل ٢٢-٧. العروق في ورقة القيقب maple.



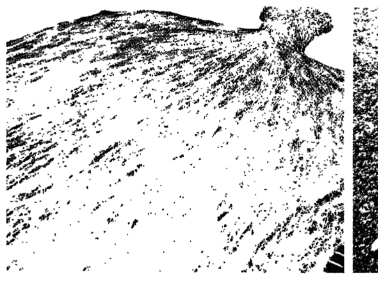
الشكل ٢٢-٨. الشعيرات الجذرية تزيد من مساحة السطح وذلك يسهل إمتصاص الماء من التربة.

انتقال الماء والأملاح المعدنية

THE TRANSPORT OF WATER AND MINEREALS

٢٢-٩. المسار: THE PATHWAY

يدخل الماء إلى النبات عبر الشعيرات الجذرية. هذه الأمتدادات لخلايا البشرة لها جدر لزجة وتلتصق بقوة إلى حبيبات التربة وهذا يجعلها على إتصال مباشر بتلك الغلالة الرقيقة من الماء التي تلتصق أيضا بحبيبات جميع أنواع التربة ما عدا التربة شديدة الجفاف "bone-dry" (الشكل ٢٢-٨). توجد الشعيرات الجذرية بالقرب من قمم الجذور فقط ولكنها توجد بأعداد هائلة. وقد أخذت قياسات دقيقة للمجموع الجذري لأحد النجيليات وهو الراى rye بعد ٤ أشهر من النمو تبين أن للنبات ٣٨٧ ميل من الجذور وكان به تقريبا ١٣ مليون قمة جذر عليها ما يقدر بحوالي ١٤ بليون شعيرة جذرية (الشكل ٢٢-٩). بمجرد دخول الماء إلى خلايا البشرة فانه يمر خلال وبين خلايا القشرة. ولكنه لابد أن يمر خلال سيتوبلازم البشرة الداخلية حتى يدخل إلى الأسطوانة المركزية. في الكثير من الجذور تشتمل البشرة الداخلية على خلايا متخصصة تسمى خلايا المرور passage cells هي التي تسهل عبور الماء إلى الأسطوانة المركزية. وبمجرد دخول الماء إلى الأسطوانة المركزية فانه يصبح حراً مرة أخرى في الأنتقال خلال

الشكل ٢٢-٩ . منطقة الإمتصاص في الجذور. الى اليسار: بعد عامين من النمو انتج نبات واحد من القمح ٣١٩ ميل من الجذور (بتصريح من ساينس سيرفيس) . الى اليمين : تزداد مساحة سطح الجزء الماص للماء كثيرا بواسطة الشعيرات الجذرية عند قمة كل جذر (كما تبدو في جذر ابتدائي لبادرة الفجل) .

وبين الخلايا. في الجذر الحديث يدخل الماء إلى الخشب مباشرة أما في الجذور المسنة فانه قد يكون عليه أن يمر أولا عبر شريط اللحاء والكامبيوم وهو يفعل ذلك عن طريق خلايا مستطيلة أفقيا هي خلايا أشعة الخشب xylem rays.

قد يفترض البعض أن الأملاح المعدنية تدخل و تتحرك داخل النبات ببساطة وهي ذائبة في الماء. وبينما يشترك الماء والأملاح المعدنية في نفس المسار النهائي فان إمتصاص الجذر للأملاح المعدنية له عدة سمات خاصة. فحتى عندما لا يمتص الجذر أي ماء فإن الأملاح المعدنية تدخل بحرية تامة. بل أكثر من ذلك أنها تستطيع الدخول ضد فرق التركيز أي من منطقة تركيز منخفض (التربة) إلى منطقة تركيز مرتفع (خلايا الجذور) لذا فان النقل النشط active transport لابد أن يكون له دور . وفي الواقع فان أي شيء من شأنه تعطيل عمليات النقل النشط بصفة عامة يعطل إمتصاص الأملاح المعدنية.

ربما ينبغي أن نؤكد هنا على أن كل العناصر التي يحتاج اليها النبات تُمتص على صورة غير عضوية أي أملاح معدنية . النتروجين يدخل على هيئة نترات (NO_3^-) أو أيونات أمونيوم (NH_4^+) . الفوسفور على هيئة فوسفات $PO_4^{\equiv}$ ، البوتاسيوم على هيئة أيونات K^+

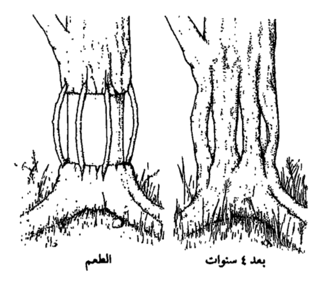
الكالسيوم على هيئة أيونات Ca^{++} وهكذا وعندما يستمع المرء إلى مزايا السماد العضوي عليه أن يتذكر أن هذه المادة لن تلبي الإحتياجات الغذائية للنبات حتى تتحلل إلى صورة غير عضوية. المادة العضوية تلعب دور هام في إكتساب التربة لملمس جيد ولكنها لاتسد الأحتياجات الغذائية للنبات إلا بقدر ما تنتجه من أيونات غير عضوية.

بمجرد وجود الأيونات غير العضوية داخل خلايا البشرة للجذر فانها تعبر من خلية إلى خلية ربما عن طريق الروابط البلازمية. الخطوة الأخيرة من سيتوبلازم خلايا الطبقة المحيطة إلى الخشب تتحقق مرة أخرى بالنقل النشط.

وحالما يدخل الماء والأملاح المعدنية المترسبة فيه إلى الخشب فانها تتحرك إلى أعلى في الأوعية والقصيبات وهي تصعد خلال الجذر والساق. ويستطيع الماء أن يغادر الخشب عند أي مستوي ويمر جانبيا لأمداد الأنسجة الأخرى بما تحتاج اليه. عند الأوراق ينحرف الخشب إلى عنق الورقة petiole ومنه إلى عروق الورقة. نظرة إلى النُدبة التي يتركها تساقط الأوراق من السوق الخشبية في الخريف سوف تبين النهايات المقطوعة للحزم الوعائية التي كانت تمد هذه الأوراق.

عند نهايات العروق يغادر الماء الخشب ويدخل إلى طبقة الخلايا الأسفنجية spongy layer والطبقة العمادية palisade layer من الورقة. هنا يستعمل الماء في البناء الضوئي وقد يتبخر من الأوراق في عملية تسمى النتح transpiration.

هناك براهين عديدة تدل على أن صعود الماء يحدث في الخشب. فمثلا إذا إنتزعت حلقة من قلف إحدى الأشجار بعناية وبذلك يتم التخلص من اللحاء فان صعود الماء سوف يستمر بلا انقطاع. مثل هذه العملية تسمى التحزيم girdling. ويتم تحزيم أشجار الفواكه وهي صغيرة بكثرة أثناء الشتاء بواسطة فئران الحقول الجائعة التي تتغذى على القلف. وعند دخول الربيع تظهر الأوراق على الأشجار بصور طبيعية مما يعني أن صعود الماء والأملاح المعدنية لم يتعطل ومع ذلك فانه ما لم يتم تطعيم خاص للشجرة (الشكل ٢٢-١٠) فانها في النهاية سوف تموت. (لماذا؟). دليل اضافي على صعود الماء يأتي من وضع القمة المقطوعة لنبات في ماء يحتوي على احدى الأصباغ ينسحب الماء في الساق لبعض الوقت ثم يبين الفحص المجهرى للأنسجة الوعائية أن الصبغة قد تركزت في أوعية الخشب.



الشكل ٢٢-١٠. التطعيم بالجور الذي يستخدم لإنقاذ الأشجار القيمة التي يحدث لها تحزيم. بدون هذا التطعيم تموت الجذور بسبب نقص الغذاء.

٢٢-١٠. مقدار الأنسياب : النتح

MAGNITUDE OF FLOW: TRANSPIRATION

أي نظرية لتفسير صعود الماء في الخشب لابد أن تأخذ في الأعتبار الحجم الكبير للماء المنقول والسرعة التي ينتقل بها الماء. النباتات العشبية قد تمتص حجم من الماء يفوق عدة مرات حجم النبات نفسه كل يوم. الماء الذي يحتوي على النظائر المشعة تبين أنه ينتقل خلال الساق بمقدار ٧٥سم في الدقيقة.

١-٢٪ فقط من كل هذا الماء يستخدم في البناء الضوئي أو في النشاطات الأيضية الأخرى لخلايا الورقة. أما الباقي فانه يتبخر من الورقة بعملية النتح transpiration في الباب الحادي والعشرين علمنا أن الماء يتبخر إلى المسافات الهوائية في الطبقة الأسفنجية. وعندما تتفتح الثغور stomata ينتشر بخار الماء إلى الخارج. وإذا كان للورقة أن تستمر في أداء وظائفها بصورة طبيعية فانه لابد من إمدادها بكميات جديدة من الماء لتعويض الماء المفقود بالنتح.

يوضح الشكل ٢٢-١١ جهاز يمكن بواسطته تقدير كمية بخار الماء المفقود بالنتح. كلما إمتصت جذور النبات الماء حل محله ماء من الخزان الموجود في الجانب الأيمن عبر الأنبوبة المدرَّجة. وتعمل فقاعة هوائية يتم إدخالها في الجهاز على تقدير الحجم المستهلك. على الرغم من أن الجهاز الذي يسمى بوتومتر potometer يقيس الأستهلاك الكلي للنبات من الماء إلا أن ٩٨-٩٩٪ من هذا الماء يفقد بالنتح.

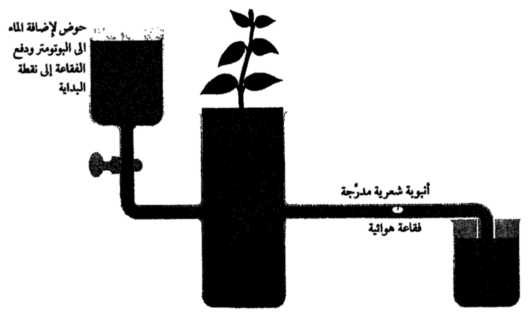
٢٢-١١ . العوامل المؤثرة على معدل النتح
FACTORS AFFECTING THE RATE OF TRANSPIRATION

بإستخدام البوتومتر يمكن دراسة تأثير العوامل البيئة المختلفة على معدل النتح .

١ ــ **الضوء** Light: النباتات تنتح بسرعة أعلى بكثير إذا تعرضت للضوء عما لو كانت في الظلام . السبب الرئيسي هو أن الضوء يعمل على تفتح الثغور (أنظر القسم ٢١-٤) وبذلك يزيد كثيرا من نقل الهواء المحمل بالرطوبة من المسافات الهوائية في الطبقة الأسفنجية إلى الخارج . الضوء يزيد أيضا من سرعة النتح عن طريق تدفئة الأوراق .

٢ ــ **درجة الحرارة** Temperature: النباتات تنتح الماء أسرع بكثير عند درجات الحرارة العالية . عند درجة ٣٠ °م تنتح الورقة بثلاثة أضعاف سرعة النتح عند درجة ٢٠ °م . سبب ذلك أن الماء يتبخر أسرع كلما إرتفعت درجة حرارته وفي هذه الحالة تزيد رطوبة الهواء الموجود في المسافات الهوائية عما هو موجود بالخارج .

٣ ــ **الرطوبة** Humidity: يتأثر معدل النتح أيضا بالرطوبة النسبية في الجو المحيط بالنبات . يقل معدل إنتشار أي مادة كلما قل الفرق في تركيز هذه المادة في



الشكل ٢٢-١١ . البوتومتر أثناء الأستعمال . كلما نتح النبات الماء أو إستعمله في اغراض اخرى يتم تعويضه بماء من الحوض الأيمن وهذا يدفع الفقاعة الهوائية الى اليسار وبذلك يسمح بقياس كمية الماء المستعمل بدقة .

منطقتين. والعكس أيضا صحيح. لذلك فان إنتشار الماء من المسافات الهوائية المعبأة بالرطوبة في الورقة إلى الخارج يتباطأ كلما زادت الرطوبة في الجو المحيط بها. وعندما يكون الجو الخارجي جاف تزداد سرعة الأنتشار.

٤ ــ **الرياح** Wind: وجود تيارات هوائية لطيفة يزيد كذلك من معدل النتح. وعندما لاتوجد هذه التيارات يصبح الجو الملامس مباشرة للنبات مشبع بالرطوبة. ويتسبب ذلك في تخفيض معدل النتح لنفس السبب المذكور آنفا. وفي وجود رياح شديدة فانها تحمل الهواء الرطب بعيدا ليحل محله هواء جديد اكثر جفافا.

٥ ــ **ماء التربة** Soil Water: لا يستطيع النبات أن ينتح بسرعة ما لم يتم تعويض الماء المفقود بامتصاص مزيد من الماء من التربة. عندما يفشل امتصاص الجذور للماء من مواكبة معدل النتح يحدث نقص في الأمتلاء و تغلق الثغور. ويؤدي ذلك مباشرة إلى خفض كبير في معدل النتح. غالبا ما يمتد نقص الأمتلاء إلى أعضاء النبات الأخرى ويحدث الذبول wilting.

في الظروف المثلى يكون فقد الماء من خلال النتح هائلا ويقدر أن فدان واحد من نباتات الذرة قد ينتح في موسم النمو حوالي ٤٠٠ ألف جالون من الماء. هذه الكمية تكفي في صورتها السائلة لتغطية هذا الحقل ببركة من الماء عمقها ١٥ بوصة. كمية الماء التي ينتحها فدان من أشجار بالغة في غابة نفضية deciduous forest قد تكون أكبر من ذلك بكثير.

لابد لأي نظرية أن تفسر ليس فقط كميات الماء الهائلة المنقولة خلال الخشب ولكن أيضا الأرتفاعات الشاهقة التي يصعدها الماء. أشجار السيكويا sequoia وتنوب دوجلاس Douglas fir المنتشرة على ساحل المحيط الهادي عادة تصل إلى ارتفاع ٣٠٠ قدم أو أكثر. وزن عمود من الماء له مثل هذه الأرتفاع يخلق ضغط مقداره حوالي ١٤٠ رطل/بوصة مربعة. فإذا أخذنا في الأعتبار سرعة صعود الماء في الخشب والمقاومة المضادة لهذا الأنسياب من جدر القصيبات فانه من المحتمل أننا نحتاج لقوة دفع (أو جذب) مقدارها ٣٠٠-٤٠٠ رطل/بوصة مربعة.

أي نظرية لتفسير صعود الماء لابد أن تعتمد بالكامل على أسس فيزيائية. تذكّر أن أوعية الخشب والقصيبات ميتة تماما. وقد أوضح ذلك أحد علماء النبات الألمان عندما قطع شجرة بلوط ارتفاعها ٧٠ قدم وغمس قاع الجذع في برميل به محلول حمض

البكريك . إرتفع المحلول في الجذع قاتلا كل الأنسجة القريبة منه كلما تقدم لأعلى وبعد ثلاثة أيام كان الماء - الذي أضيفت إليه إحدى الأصباغ - مايزال يواصل ارتفاعه بنجاح إلى قمة الشجرة.

نظريات انتقال الماء : THEORIES OF WATER TRANSPORT

هناك نظريتان تستحقان الذكر لتفسير صعود الماء في الخشب .

٢٢-١٢ . الضغط الجذري : ROOT PRESSURE

عندما يقطع نبات طماطم بعناية بالقرب من قاعدة الساق يبرز سائل - عصارة - من الجزء المقطوع . اذا تم توصيل جهاز لقياس الضغط بهذا الجزء المقطوع نجد ان هذه العصارة تخرج منه تحت ضغط كبير (الشكل ٢٢-١٢) . هذا الضغط يسمى بالضغط الجذرى. على الرغم من أن هذه التجربة ليست سهلة فقد سجل بعض الباحثين أن الضغط الجذري في نبات الطماطم يصل إلى ١٣٠ رطل/بوصة مربعة. وبينما لا يستطيع هذا الضغط رفع العصارة إلى قمة شجرة سيكويا إلا أنه يكفي لرفعها إلى قمة نبات الطماطم بل إلى قمة معظم الأشجار .

من المعتقد أن أصل الضغط الجذري يكمن في الفرق بين تركيز ماء التربة وتركيز العصارة في قنوات الخشب. وقد تكون عصارة الخشب زائدة التوتر hypertonic بالنسبة لماء التربة بسبب وجود السكريات الذائبة أو الأملاح التي دخلت إلى الأسطوانة المركزية بالنقل النشط. ويكون ذلك صحيحا بصفة خاصة في النباتات الخشبية المعمرة حينما يحدث بها تميؤ.

الشكل ٢٢-١٢. قياس الضغط الجذري في نبات الطماطم.

للمواد النشوية المختزنة في جذورها إلى سكريات في الربيع المبكر. تذهب النظرية إلى أنه في مثل ذلك الوقت يمر الماء بالخاصية الأوزموزية خلال البشرة الداخلية إلى قنوات الخشب. إنسياب الماء إلى داخل أوعية الخشب المليئة بالعصارة يخلق ضغط يتم تنفيسه بصعود العصارة في هذه القنوات. هذه أساسا هي نفس الآلية التي إرتفع بها محلول المولاس في مقياس الأوزموزية الذي وصفناه في القسم ٦-٤.

بينما أصبح الضغط الجذري الآن حقيقة مؤكدة إلا أنه لا يعطي تفسير كامل لصعود الماء في الخشب وعلى الرغم من تسجيل ضغوط جذرية عالية في نبات الطماطم فانه لم يحدث تقريبا أن وجدت نباتات أخرى يزيد فيها الضغط الجذري عن ٣٠ رطل/بوصة مربعة كما أنه لم يمكن إكتشاف أي ضغط جذري بالمرة في العديد من النباتات.

كذلك فان حجم الماء المنقول بالضغط الجذري غير كاف لتفسير كميات المياة التي ينقلها الخشب. أضف إلى ذلك أن النباتات التي تبعث جذورها بكميات معقولة من العصارة عادة يكون بها أقل الضغوط الجذرية والعكس بالعكس.

هناك أيضا صعوبة أخرى مع نظرية الضغط الجذري لصعود الماء، فحتى في تلك النباتات التي توجد بها ضغوط جذرية تكون أعلى القيم في موسم الربيع حينما تكون العصارة زائدة التوتر بشدة بالنسبة لماء التربة بينما معدل النتح منخفض. في الصيف حينما يكون النتح سريعا وبالتالي تكون حركة الماء خلال الخشب سريعة لا يمكن الكشف عن أي ضغط جذري بالمرة.

وعلى ذلك فانه بينما قد يلعب الضغط الجذري دور هام في نقل الماء في أنواع نباتيه معينة (توضح الدراسات الحديثة أنه ربما كان أهم العوامل في حالة نخيل جوز الهند) وفي أوقات معينة الا أنه لابد لنا من البحث عن آلية بديلة.

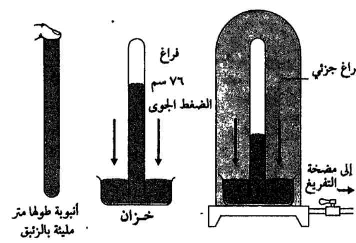
٢٢-١٣. نظرية ديكسون وجولي THE DIXON-JOLY THEORY

في عام ١٨٩٥ اقترح عالما وظائف أعضاء النبات الأيرلنديان هـ. ديكسون و ج. جولي نظرية أخرى لتفسير صعود الماء في النباتات. فقد ظنا أن الماء يتم شده بالتوتر (الضغط السالب) من أعلى بدلا من دفعه بالضغط الجذري من أسفل. وكما شاهدنا

فان الأوراق تستعمل الماء بصفة مستمرة ويؤدي النتح إلى معظم ذلك ولكن البناء الضوئي والنشاطات الكيميائية الحيوية الأخرى تؤدي إلى بعض هذا الأستهلاك كذلك. تبعا لنظرية ديكسون-جولي فإن إستهلاك الماء في الأوراق يعمل على جذب الماء إلى أعلى في قنوات الخشب لسحب المزيد من الماء إلى الأوراق. الجذب الواقع على الماء في أوعية الخشب ينبعث بدوره إلى الجذور فيسحب الماء من التربة إلى أوعية الخشب بالجذر.

أي شخص درس علم الفيزياء يعلم أنه حتى أدق مضخة تفريغ vacuum pump تستطيع جذب الماء حتى ارتفاع ٣٢ قدم وذلك لأن عمود ماء بهذا الأرتفاع يمارس ضغط (حوالي ١٥ رطل/بوصة مربعة) يكفي تماما لمعادلة الضغط الجوي (الشكل ٢٢-١٣) كيف يمكن إذن سحب الماء إلى ٣٠٠ قدم أو أكثر تحت ضغط ٣٠٠-٤٠٠ رطل/بوصة مربعة.

الأجابة على هذا السؤال تكمن في خاصية جزيئات الماء من حيث التشبث ببعضها البعض. هذه الخاصية تعرف بالتماسك cohesion فعندما يكون الماء محصورا في أنابيب ضيقة جدا فان قوة التماسك بين جزيئات الماء تمارس ضغط كبير على عمود الماء. وقد قدر تجريبيا أنه يلزم توتر يصل إلى ٣٠٠٠ رطل/بوصة مربعة لكسر هذا العمود من الماء وهو يعادل قوة أسلاك لها نفس القطر. وتبعا لنظرية ديكسون - جولي فان قوة التماسك لهذه الخيوط الدقيقة من الماء في قنوات الخشب بالأضافة إلى خاصية جزيئات الماء من حيث الألتصاق adhesion بجدر القنوات تمكن خيط الماء من الأنجذاب نحو قمة أعلى الأشجار دون أن ينقطع ودون أن يبتعد عن جدر القنوات. استهلاك الماء في



الشكل ٢٢-١٣. تركيب بارومتر فراغ تورشيللي وتأثير وضع البارومتر في غرفة من الهواء.

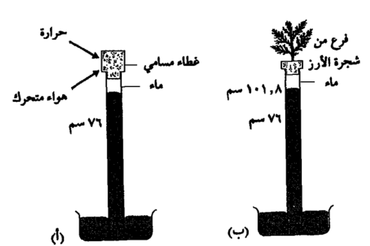
الأوراق خاصة بسبب النتح ، يخلق التوتر الذي يستمر إلى أسفل في الخشب حتى يصل إلى الشعيرات الجذرية (نظرية ديكسون ـ جولي غالبا يطلق عليها اسم نظرية النتح بالجذب والتماسك the transpiratin pull-cohesion theory) في الواقع يكون لخيوط الماء الدقيقة نفس الخواص الفيزيائية للأسلاك الصلبة .

٢٢-١٤ . دليل صحة النظرية EVIDENCE FOR THE THEORY

ماهو الدليل على صحة هذه النظرية؟ الشكل ٢٢-١٤ فيه نموذج تجريبي يبين أنه من الممكن بالفعل صعود الماء بهذه الالية . تبخر الماء عند غطاء الطين المسامي يخلق توتر ينتقل إلى الماء والزئبق الموجودين في الأنبوبة الزجاجية . عند مراعاة عدم وجود هواء ذائب في الماء أمكن سحب عمود الزئبق إلى ارتفاع يصل إلى ٢٢٦ سم وهذا يكافيء رفع الماء إلى ما يقرب من ١٠٠ قدم في الهواء أو ثلاثة أضعاف الأرتفاع الناجم عن الضغط الجوى الذي يعمل ضد فراغ تام .

هذا النموذج يوضح فقط أن هذه الظاهرة ممكنة ولكنه لا يثبت أنها تحدث بالفعل . عند احلال فرع من شجرة الأرز cedar محل الغطاء المسامي فان الزئبق يرتفع إلى أكثر من الأرتفاع (حوالي ٧٦ سم) الذي يسببه الفراغ التام .

فإذا قبلنا النظرية التي مؤادها أن الماء في قنوات الخشب يكون تحت توتر وليس تحت ضغط فانه يمكن استنباط بعض الحقائق المترتبة على ذلك . فإذا تأكدنا أن هذه الحقائق التي تنبأنا بها صحيحة في الواقع فاننا نكون قد تأكدنا من صحة النظرية . إذا كان الماء في وعاء خشبي تحت توتر فاننا نتوقع أن يقطع عمود الماء إذا دخل الهواء إلى الوعاء

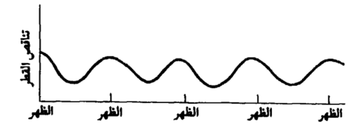


الشكل ٢٢-١٤ . إرتفاع عمود الزئبق أكثر من ٧٦٠ مم نتيجة التبخير من (أ) الغطاء المسامي، (ب) فرع من شجرة الأرز.

الخشبي عن طريق احداث ثقب فيه. وقد وجد أن ذلك يحدث بالفعل.

بالأضافة إلى ذلك إذا كان الماء في كل قنوات الخشب تحت توتر كبير فانه ينبغي أن يكـون هنـاك جذب للداخل (بسبب قوى التلاصق) على جدر هذه القنوات. هذا الجذب نحو الداخل على جدر كل القنوات في منطقة الخشب العصيري بشجرة فيها نتح نشط ينبغي بدوره أن يؤدى إلى تناقص في قطر الشجرة. هذا الأستنتاج يمكن إختبـاره عن طريق القياس المستمـر، بالأجهـزة المناسبة، لأقطار جذوع الأشجار. الشكل ٢٢-١٥ يعطي النتائج التي توصل إليها عالم وظائف أعضاء النبات الأمريكي د. ت ماكدوجال باستخدام جذع إحدى أشجار صنوبر مونتيري Monterey pine. لقد تذبذب بالفعل قطر الشجرة ووصل إلى أقل قيمة بعد منتصف النهار مباشرة وهو وقت أعلى معدل للنتح.

في عام ١٩٦٠ أجـرى فريق من علماء وظائف أعضاء النبات العامليـن في أدغال شمـال شرق أستراليـا تجارب على نبـات أسل الهنـد rattan vine أضافت دليل جديد على صحة نظرية ديكسون-جولي. يتسلق أسل الهند على أشجار الغابة ومن أجل أن يرتقى بأوراقه إلى الضوء يكون عليه أن يتسلق حتى إرتفاع ١٥٠ قدم. عند قطع هذا المتسلق وغمسه في حوض به ماء فانه يستمر في سحب الماء. من الواضح أن الضغط الجذري ليس له دور في هذه العملية لأن النبات قد إنفصل عن مجموعة الجذري. نبات أسل الهند الذي يقل قطره عن بوصة واحدة سوف يشرب الماء بصورة غير محدودة بمعدل ١٢ ميلليلتر في الدقيقة. وإذا أجبر على أخذ الماء من وعاء محكم الأغلاق فانه يفعل ذلك دون أي نقص في المعدل على الرغم من الفراغ الشديد الذي سرعان ما ينشأ في الوعاء. في الواقع يكون الفراغ شديدا لدرجة أن الماء المتبقى في الوعاء يأخذ في الغليان من تلقاء نفسه. (درجة غليان الماء تنخفض كلما إنخفض الضغط الجوى فوق الماء).



الشكـل ٢٢-١٥. التبـاين اليومي في قطر شجرة صنوبر مونتيري. يصل قطر الشجرة إلى اقل قيمة له عندما يكون معدل النتح في اعلى قيمة له.

تقدم نظرية ديكسون-جولي تفسيرا لقدرة نباتات وعائية معينة على الحياة في الماء المالح . تنمو جذور نباتات الشورى mangrove في الماء المالح وهو محلول زائد التوتر بالنسبة لسيتوبلازم خلاياها. على أساس تركيزات الماء فاننا نتوقع أن يخرج الماء من خلايـا النبات وتحـدث البلزمـة plasmolysis (تذكر كيف حدثت في خلايا الألوديا في الماء المالح - أنظر الشكل ٦-٨). ومع ذلك فقد قيست توترات عالية للغاية في الجهاز الوعائي لنباتات الشورى. هذه التوترات (والتي تبلغ ٥٠٠-٨٠٠ رطل/بوصة مربعـة) من الضخامة بحيث تستطيع شد جزيئات الماء في النبات ضد فرق الجهد الأوزموزي. بهذه الطريقة تستطيع نباتات الشورى تحلية ماء البحر لتغطية إحتياجاتها المائية.

على أسـاس كل هذه الأدلة تستطيع نظرية ديكسون-جولي تقديم تفسير مقبول لصعود السوائل في النباتات. وعلى الرغم من بقاء العديد من الأسئلة بدون إجابات إلا أن علماء وظائف أعضاء النبات يشعرون بأن النظرية قد تم إختبارها بما فيه الكفاية وأنها تصف بنجاح آلية صعود الماء والأملاح المعدنية الذائبة فيه من التربة إلى الأوراق في معظم إن لم يكن في كل النباتات.

انتقال الغذاء THE TRANSPORT OF FOOD

٢٢-١٥ . المسار THE PATHWAY

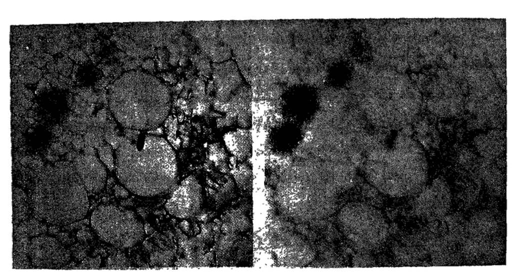
ينتقـل الغذاء والمواد الأخرى (مثل الهرمونات) التي يقوم النبات بتصنيعها خلال الحـزم الـوعـائية أيضا. فالسكريات (عادة السكروز) والأحماض الأمينية والجزيئات العضوية الأخرى التي تم تصنيعها في الأوراق تدخل إلى خلايا اللحاء. وقد تعمل الروابط العضوية البلازمية على تسهيل هذا الدخول إذ أنها تربط خلايا البناء الضوئي في الأوراق بخلايا اللحاء.

بمجرد وجود السكر والجزيئات العضوية الأخرى في اللحاء فانها قد تنتقل إلى أعلى أو إلى أسفل إلى أي منطقة في النبات. في حالة السكر الذي يكون مصيرة التخزين في الجذور فانه يمر في صورة محلول خلال الساق والجذر وما أن يصل إلى الجذر حتى يخرج من اللحاء ويمر خلال الطبقة المحيطية والبشرة الداخلية إلى خلايا القشرة وهنا يمكن

تحويله إلى نشا ويحفظ كغذاء مختزن.

إنتقال الغذاء خلال اللحاء يمكن توضيحه بتجارب التحزيم. في الصيف وعند تحزيم الشجرة بحيث يستبعد منها اللحاء ويبقى الخشب كاملا تستمر الشجرة على قيد الحياة. ومع ذلك لا تحدث زيادة في وزن الجذور. أكثر من ذلك أن التحليل الكيميائي للقلف الموجود أعلى الحزام مباشرة يدل عل تراكم هائل للمواد الكربوهيدراتية. (هذا التراكم لا يحدث بعد التحزيم أثناء موسم الكمون حينما لا توجد أوراق على الشجرة). لايحدث التراكم للسكر في القلف الموجود أسفل الحزام مباشرة.

دليل مباشر آخر على المسار الذي تسلكه المواد العضوية في النبات موضح في الشكل ٢٢ - ١٦ . تم امداد ورقة بماء مشع (^{3}HOH) وتركت لتقوم بالبناء الضوئي لمدة ٣٠ دقيقة. وبعد هذه المدة تبين أن النشاط الأشعاعي في العنق (الذي يمر فيه الخشب واللحاء من نصل الورقة إلى الساق) قد تركز في الأنابيب الغربالية والخلايا المرافقة.



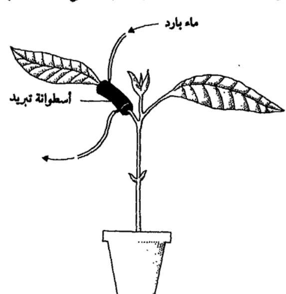
الشكل ٢٢-١٦. توضيح بالتصوير الإشعاعي الذاتي أن نواتج البناء الضوئي تنتقل خلال اللحاء. تم إمداد ورقة نبات الخيار بماء مشع وتركت لتقوم بالبناء الضوئي لمدة ٣٠ دقيقة. عندئذ أخذت شرائح من العنق وغمرت بمستحلب تصوير. النواتج المشعة للبناء الضوئي جعلت المستحلب قاتما عند أماكن ملامستة للحاء (الجانب الأعلى الأيسر) ولكن ليس عند أماكن ملامسته للخشب (الوسط). في الصورة اليسرى المأخوذة بالمجهر كان التركيز على الأنسجة حتى تتضح الخلايا تماما، في الجانب الأيمن كان التركيز على مستحلب التصوير. (بتصريح من ر. س. جاج وس. أرونوف).

تنتقل المواد الغذائية خلال اللحاء بكفاءة عالية. فبعض الثمار مثل القرع العسلى Pumpkin تتلقى أكثر من نصف جرام من المواد الغذائية كل يوم من خلال اللحاء وقد وجد أن ثمار أخرى تتلقى أكثر من ذلك. وحيث أن الغذاء ينتقل في صورة محلول مائي مخفف إذن لابد من أنه ينساب بسلاسة عالية وفي الواقع أوضحت الدراسة بالنظائر المشعة أن المواد تستطيع الأنتقال خلال ١٠٠ سم من اللحاء في الساعة.

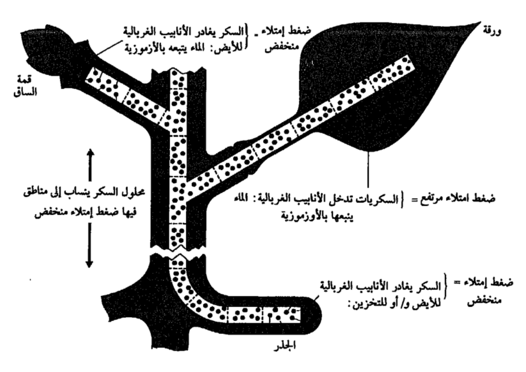
٢٢-١٦. آلية انتقال الغذاء MECHANISM OF FOOD TRANSPORT

آلية انتقال السكرات والجزيئات الأخرى التي يقوم النبات بتصنيعها خلال اللحاء ليست مفهومة حتى الآن. ويبدو أنها تعتمد على النشاط الأيضي لخلايا اللحاء لأن أي ظروف تبطيء من أيضها تبطيء أيضا من معدل الإنتقال. الشكل ٢٢-١٧ يوضح الجهاز المستخدم في دراسة تأثير خفض درجة الحرارة على معدل الأنتقال. نقص الأوكسجين أيضا يقلله وأي شيء يقتل خلايا اللحاء يضع نهاية للعملية كلها.

وضعت عدة نظريات لتفسير حركة المواد الغذائية خلال اللحاء. طبقا لأحدى هذه النظريات فان الماء الذي يحتوي على جزيئات الغذاء في محلول ينساب تحت ضغط خلال اللحاء. وينشأ هذا الضغط من الفرق في تركيز الماء في المحلول الموجود بالخشب وفي الماء النقي تقريبا الموجود في قنوات الخشب القريبة. مع تراكم السكرات والنواتج الأخرى للبناء الضوئي في اللحاء يدخل الماء بالخاصية الأوزموزية (الشكل ٢٢-١٨)



الشكل ٢٢-١٧. خفض درجة حرارة العنق يخفض من معدل إنتقال الغذاء من الأوراق.



الشكل ٢٢-١٨. نظرية الإنسياب بالضغط لشرح الإنتقال خلال اللحاء. فرق الضغط بين (١) الأوراق و (٢) الساق والجذر يدفع العصارة إلى أعلى وإلى أسفل في الأنابيب الغربالية (جزيئات السكر مبينة باللون الأسود وجزيئات الماء ملونة).

وبذلك ينجم عن الضغط داخل هذه الخلايا شيء يشبه عكس الضغط الجذري. كلما إندفعت العصارة في اللحاء إلى أسفل (وإلى أعلى) فان السكرات تنسحب إلى قشرة الساق والجذر حيث تستهلك أو تتحول إلى نشا. النشا غير قابل للذوبان وليس له تأثير أوزموزي ويترتب على ذلك أن ينخفض الضغط الأوزموزي لمحتويات اللحاء. وفي النهاية لا يبقى في اللحاء إلا ماء نقي نسبيا ومن المعتقد أنه يخرج بالأوزموزية أو بالرجوع إلى أوعية الخشب القريبة بفعل الجذب الناشيء عن النتح أو بكليهما معاً.

إلى أي مدى تتفق هذه النظرية مع الحقائق والمشاهدات؟ طبقا لهذه النظرية لابد أن تكون محتويات الأنابيب الغربالية تحت ضغط وقد وجد أن ذلك صحيحا. فعندما تثقب الحشرات الماصة للعصارة مثل المن aphids الأنابيب الغربالية فان العصارة تنساب إلى أجزاء فم الحشرة ثم إلى جسمها بدون مساعدة إضافية. وحتى إذا فصل جسم الحشرة عن أجزاء الفم فان العصارة الغنية بالسكر تستمر في الأنسياب عند مكان القطع (الشكل ٢٢-١٩). تتطلب هذه النظرية أيضا أن يكون الضغط الأوزموزي




الشكل ٢٢-١٩. إلى اليسار: حشرة من تتغذى على فرع من شجرة زيزفون. السكر الزائد يخرج على هيئة قطرة من العسل الذي يصلح كغذاء للنمل والنحل. تدخل العصارة الموجودة في اللحاء إلى فم الحشرة تحت ضغط. إلى اليمين: ستظل القطرة تبرز من أجزاء الفم بعد إستئصال جسم الحشرة عن فمها. (بتصريح من مارتن هـ. زيمرمان، سانيس، ١٣٣-٧٩، ١٩ يناير ١٩٦١).

في لحاء الأوراق اكبر منه في لحاء الأعضاء المستقبلة للغذاء مثل الجذور. ويبدو ذلك صحيحا بصفة عامة على الرغم من وجود إستثناءات واضحة.

من ناحية أخرى فان المرء يتنبأ على أساس هذه النظرية بأن العوامل المؤثرة على معدل الأيض في خلايا اللحاء نفسها لايكون لها تأثير على الأنتقال والسبب أن الطاقة الأيضية تكون مطلوبة فقط عند نهايات الجهاز أي لترتيب السكرات في لحاء الأوراق ولسحبهم مرة أخرى من لحاء الجذر والساق النامي (الشكل ٢٢-١٨). ولكن كما رأينا فان النقل خلال اللحاء يتأثر بالتثبيط الموضعي للأيض فيه (الشكل ٢٢-١٧). أضف إلى ذلك أن هناك سؤال حقيقي عما إذا كانت الضغوط المقاسة كافية لدفع العصارة خلال الأنابيب الغربالية بالسرعات التي تم تسجيلها.

هناك نظريات أخرى بديلة تتجنب الصعوبات التي تكتنف نظرية الأنسياب بالضغط pressure-flow (ولكن تكتنفها الصعاب الخاصة بها). العديد من هذه النظريات تفترض وجود نوع من الضخ الموضعي يعمل في تسلسل على طول الأنابيب الغربالية- ربما عند كل صفيحة غربالية. مثل هذه النظريات يمكن أن تفسر لماذا يمتنع الأنتقال خلال جزء محدود من اللحاء بالتبريد. ومع ذلك فحتى الآن لا توجد نظرية واحدة تعطى تفسير كافي لكل الحقائق المعروفة عن الأنتقال في اللحاء. مثل تلك

النظرية مازالت في إنتظار المزيد من الملاحظات وطرق القياس الأفضل والتجارب الجديدة وبصفة خاصة التخيل البناء الذي يستطيع تجميع كل ذلك في نظام شامل.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

الخشب واللحاء يمثلان واحدا من أهم مظاهر تأقلم النباتات مع البيئة الأرضية. من أجل الأستمرار في القيام بعملية البناء الضوئي لابد للنباتات من تعريض سطح واسع يحتوي على الكلوروفيل للضوء. بالنسبة للنباتات الأرضية فان ذلك يعني تعريض سطح واسع للتأثير الجفافي للهواء وحتى يستمر النبات الأرضي حيا فلابد له من الحصول على الماء اللازم للبناء الضوئي ولتعويض الماء المفقود بالنتح وذلك بماء جديد من التربة. كما رأينا فان تركيب ووظيفة الخشب يسمحان بذلك. ومن ناحية أخرى فان الجذور التي تمتص الماء تحتاج إلى الغذاء كى تظل على قيد الحياة واللحاء يحل مشكلة النقل هذه. هذان النسيجان لعبا دورا حاسما في غزو النباتات الوعائية لكل أرض مكشوفة على هذا الكوكب تقريبا بنجاح.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ تتبع المسار الذي تسلكه ذرة هيدروجين من لحظة دخولها إلى احدى الشعيرات الجذرية وهي في جزيء ماء حتى لحظة تخزينها في قشرة الجذر وهي في جزيء نشا.

٢ ــ ما هي نواحي الإختلاف بين الجهاز الدوري لنبات والجهاز الدوري لحيوان فقاري؟

٣ ــ الكثير من النباتات قليلة الأرتفاع يفرز قطرات من الماء على طول حواف الأوراق. هذه الظاهرة التي تعرف بالأدماع guttation تحدث بصفة خاصة أثناء ليالي الربيع الرطبة. ما هي قوى رفع الماء في الخشب التي تعتقد أنها مسئولة عن الأدماع؟ ولماذا؟

٤ ــ ماهي وظائف الجذور في شجرة القيقب؟

٥ ــ لماذا يتم تقليم بعض الفروع من شجرة أو شجيرة بعد نقلها مباشرة ؟

٦ ــ إذا كنت تقوم بعد الحلقات السنوية في شجرة دردار ووجدت بضع حلقات

ضيقة داخل عدد من الحلقات الواسعة فماذا تستنتج من ذلك؟

٧ ــ ماهو التلاصق؟ وما هو الدور الذي يلعبه في عملية صعود الماء؟

٨ ــ ما هو التماسك؟وما هو الدور الذي يلعبه في عملية صعود الماء؟

٩ ــ ماهي وظيفة صعود العصارة بالنسبة لشجرة قيقب؟

المراجع : REFERENCES

1- ZIMMERMANN, M. H., "How Sap Moves in Trees," Scientific American, Offprint No. 154, March, 1963. a brief review of our knowledge of translocatioh in both the xylem and the phloem.

2- RAY, P. M., The Living plant, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1972. Chapters 5 and 7 expand on the topics treated in this chapter.

3- EPSTEIN, E., "Roots," Scientific American, Offprint No. 1271, May, 1973. With examples on the role roots play in "mining" the minerals of the soil.

4- WOODING, F. B. P., Phloem, Oxford Biology Readers, No. 15, Oxford University Press, Oxford, 1971.

5- RUTTER, A. J., Transpiration, Oxford Biology Readers, No. 24, Oxford University Press, Oxford, 1972.

CHAPTER 23 الباب الثالث والعشرون

الاجهزة الدورية في الحيوانات
ANIMAL CIRCULATORY SYSTEMS

الباب الثالث والعشرون
الأجهزة الدورية في الحيوانات

٢٣-١ . آليـات النقل البسيطـة :
SIMPLE TRANSPORT MECHANISMS

لا تحتاج الأحياء الدقيقة والحيوانات الصغيرة جداً لجهاز خاص بالنقل. فالانتشار، النقل النشط، سريان السيتوبلازم كافية كلها لتأكيد أن كل جزء من أجسامها يحصل على احتياجاتـه من المواد. فالفراغات الغذائية التي تتكون في الأميبا يحركها سريان السيتوبلازم في جميع أنحاء الخلية حيث يحدث الهضم للمحتويات الغذائية. وتمر بعد ذلـك جزيئـات الغذاء المهضوم بالانتشار أو بالنقل النشـط (Active Transport) في السيتـوبـلازم. وحتى يمكن لحيوان معقد كالبلاناريان أن يعيش بدون دورة دموية حقيقية - بالرغم من وجود كمية قليلة من السائل الذي تستحم فيه أجهزة البلاناريان الداخلية - فالحركة الوحيدة التي تصدر عن هذا الحيوان هي حركات جسمه القليلة من الانقباض والانفراج. ولقد رأينا أن شكل حيوان البلاناريان يجعله في غير حاجة ضرورية لجهـاز خاص لحمـل الأوكسجين وثاني اكسيد الكربون - كما أمكن تقليل الحاجة للنقل الكثير للمواد الغذائية المهضومة بوجود فراغ جهازي معوي كثير التفرع (انظر الشكل ٣٩-٥). ويحدث الهضم في البلاناريان داخل الخلية ولا توجد منطقة في الجسم تبعد عن الخلايا التي تبتلع المـواد داخل البلازما (Endocytic) والتي تبطن الفراغ الجهازي المعوي والذي يحدث فيه الهضم.

٢٣-٢ . جهاز مغلق: دودة الأرض:
A (CLOSED) SYSTEM: THE EARTHWORM

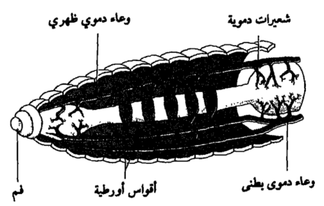
دودة الأرض حيوان كبير ومعقد، ولها جهاز دورى لنقل المواد، ولها جميع الصفات

الضرورية لجهاز دورى فعال، وهذه الصفات هي: (١) سائل تذوب فيه المواد المراد نقلها، (٢) جهاز من الأوعية أو القنوات التي يسير فيها السائل، (٣) مضخة تعمل دائما على سريان السائل، (٤) أجهزة خاصة للقيام بتغييرات بين السائل والبيئة الخارجية. وتضم تلك الاجهزة (مثل جدار الجسم والامعاء) والتي تضيف مواداً إلى السائل، وأجهزة أخرى (مثل جدار الجسم وأعضاء الإخراج) والتي تبعد المواد من السائل وتقذفها في البيئة الخارجية.

والسائل الجاري في دودة الأرض هو الدم، وهو غالباً ماء تذوب فيه غازات، سكريات، أحماض أمينية، أملاح وجزيئات أخرى وأيونات كثيرة تلعب دوراً في التمثيل الغذائي في دودة الأرض. وتزداد كفاءة دم دودة الأرض كوسيلة لنقل الأوكسجين بوجود حبيبات حمراء تعمل على حمل الأوكسجين هي الهيموجلوبين. ولا يوجد هيموجلوبين دودة الارض في داخل خلايا دم حمراء كما في الإنسان، ولكنه ببساطة يكون ذائباً في الدم.

وينقل الدم في دودة الأرض في جهاز دموي وعائي متقن، ويمكنه فقط القيام بوظيفة تبادل المواد مع الخلايا الفردية عندما يمر داخل الشعيرات الدموية الدقيقة. ولأن الدم موجود دائماً داخل أوعية دموية، فيقال أن لدودة الأرض جهاز مقفل. وتتكون المضخة التي تدفع الدم إلى الشعيرات الدموية من خمسة أزواج من الأقواس الأورطية (الشكل ٢٣-١).

ويدفع الانقباض العضلي لجدر تلك الأقواس الأورطية الدم إلى الوعاء الدموي السفلي، ويحمل هذا الوعاء الأخير الدم تجاه خلف الدودة ويوزع الدم إلى جهاز متقن



الشكل (٢٣-١): الجهاز الدورى في دودة الأرض. يوجد الدم في أوعية دموية في كل الأوقات. وأنقباض الوعاء الدموى الظهري وخمسة أزواج من الأقواس الأورطية يحافظ على سريان الدم.

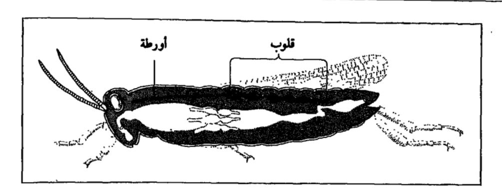
من الأوعية الأصغر منه. وكل من تلك الأوعية الصغيرة تنتهي في شعيرات دموية حيث يحدث التبادل بين أعضاء التبادل (Exchange Organs) والدم وبين الدم والأنسجة. وبمجرد وجود الدم داخل تلك الشعيرات الدموية يأخذ الدم جهاز آخر من الأوعية يؤدي إلى الـوعـاء الدموي الظهري والذي ينقبض أوتوماتيكياً، دافعاً الدم ثانية إلى الأقواس الأورطية عند النهاية الأمامية للدودة.

٢٣-٣. جهاز مفتوح: النطاط: AN (OPEN) SYSTEM: THE GRASSHOPPER

يختلف الجهاز الدوري الموجود في الحشرات عن مثيلة الموجود في دودة الأرض من وجهة هامة. فالدم في الحشرات يوجد داخل أوعية أثناء جزء واحد فقط خلال دورته في الجسم، اذ توجد بقية الرحلة في فراغ الجسم نفسه. ويعرف مثل هذا الجهاز بالجهاز الدورى المفتوح. ويبقى حجم الدم المطلوب لمثل هذا الجهاز عند حد عملي (واقعي) بتقليل حجم فراغ الجسم (Hemocoel). ويحتفظ الدم بسريانه وتوزيعة بتقسيم فراغ الجسم هذا إلى غرف تسمى تجاويف (Sinuses).

وفي النطاط، يتكون الجزء المقفل من الجهاز من أنبوبة طويلة هي القلب والأورطة واللذان يسيران موازيان للسطح العلوي للحشرة (الشكل ٢٣-٢). ويضخ القلب الدم إلى تجاويف فراغ الجسم، حيث يحدث تبادل المواد. وتعمل الحركات المنتظمة لعضـلات الجسم على رجـوع الـدم إلى الخلف في التجـويف المحيط بالقلب وهـو التجويف العلوي. وبين الانقباضات، تنفتح صمامات دقيقة موجودة في جدار القلب تسمح للدم بالدخول إلى القلب من هذا التجويف العلوي، متمماً بذلك الدورة.

ويبدو أن الجهاز الدوري المفتوح في النطاط وكأنه غير كفء بالمقارنة بالجهاز الدوري المقفل الموجود في دورة الأرض. ولكن لابد من أن يوضع في الحسبان. على أية حال أنه يوجد فرق واضح في الوظيفة التي يؤديها كل من هذين الجهازين. وتذكر أنه في النطاط؛ يحدث تبادل غازي الاوكسجين وثاني أكسيد الكربون في الجهاز القصبي، ولا يلعب الدم أي دور في هذه العملية، كما لا توجد حبيبات هيموجلوبين لحمل الاوكسجين في دم النطاط. وأثبت الكثير من التجارب والدراسات بوضوح أن مشكلة نقل الغازات هي المسئولية الرئيسية المطلوبـة من الجهـاز الدورى. وفي الحيوانات مثل النطاط وحشرات أخـرى حيث لا يعتمد تبادل الغازات على الجهاز الدورى، فإن المطلوب

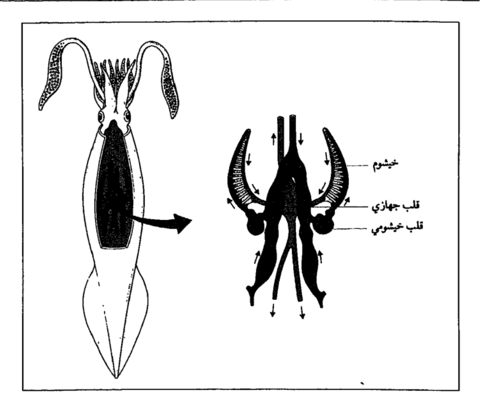


الشكل (٢٣-٢): الجهاز الدورى في النطاط هو جهاز مفتوح يوجه الدم فقط داخل أوعية فقط أثناء جزء بسيط من دورته خلال الجسم.

من الأخير أقل بكثير من المطلوب من الجهاز الدورى في حيوانات (مثل دودة الأرض) حيث أن الوظائف مرتبطة.

٢٣-٤. الاسكويد THE SQUID

ان الجهاز الدورى المقفل في الأسكويد له أهمية خاصة لانه يحتوي على ثلاثة مضخات منفصلة للحفاظ على قيام الدورة الدموية (الشكل ٢٣-٣). فيضخ أحد القلوب الدم إلى جميع الاجهزة الداخلية والانسجة بالجسم، ويعمل القلبان الاخران ببساطة على ضخ الدم من تلك الأجهزة الداخلية والأنسجة إلى الخياشيم، حيث يحدث تبادل الغازات. ولتفهم ميزة مثل هذا الجهاز، فمن المهم معرفة أن الضغط الناتج عن انقباض القلب يتبدد كليةً بمجرد دخول الدم في الشعيرات. ولو أن تلك الشعيرات دقيقة جداً، إلا أن مساحة المقطع العرضي الكلي لكل الشعيرات التي يغذيها وعاء دموي رئيسي واحد أكبر بكثير من مساحة المقطع العرضي للوعاء الدموي نفسه. ويمكن مقارنة هذه الحالة بتلك التي تحدث عند المسح لتيار ضيق ومحدد يسير بسرعة وذلك بتركة ينتشر خارجياً فوق مساحة مفلطحة، فالقوة واللزوجة للسريان تنتهي بسرعة، كما يحدث نفس الموقف في شبكة من الشعيرات. لاحظ، أيضاً، أن تبادل الغازات لابد من أن يحدث في مكانين مختلفين: الخياشيم والأنسجة، وفي كلتا الحالتين يحدث التبادل فقط عند مرور الدم في الشعيرات، وبذلك يفقد الدم أثناء مرورة بالخياشيم الضغط الذي يمكن أن يوزعة بسرعة على الأنسجة. ومن جهة أخرى، فعند مرور الدم في شعيرات الأنسجة، فإنه يفقد الضغط الذي كان يمكن أن يدفعة



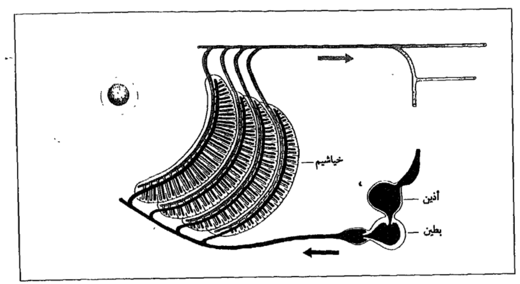
الشكل (٢٣-٣): الجهاز الدورى في الأسكويد. تضخ القلوب الخشيومية الدم الفقير في الأوكسجين (اللون الأسود) الى الخياشيم حيث يحدث تبادل الغازات. يضخ القلب الجسمي الدم الغني بالأوكسجين (اللون الفاتح) لجميع أجزاء الجسم.

بسرعة إلى الخياشيم. ويتواءم الجهاز الدورى للاسكويد ذو القلوب المنفصلة مع تلك المشكلة جيدا.

ومن الجدير بالملاحظة هنا أن الجهاز الدورى المقفل بالقلوب المنفصلة موجود أيضاً في الطيور والثدييات، ولكنه مع وجود المضختين مع بعضهما البعض، فأحد نصفي القلب في الطيور أو الثدييات يضخ الدم إلى الانسجة. ولا علاقة لنشوء مضخات منفصلة في تلك الحيوانات بذلك الموجود في الاسكويد.

٢٣-٥ . مضخة واحدة: السمك SIMPLE PUMP: THE FISH

في الحقيقة، كانت الفقاريات الأولى بها مضخة واحدة فقط. ويبقى هذا النظام مستمراً في الاسماك الحديثة. فالدم المتجمع من كل جسم السمكة يدخل في غرفة ذات جدار دقيق هي الأذين (Atrium). وأثناء راحة القلب، يمر الدم خلال صمام إلى البطين



الشكل (٢٣-٤) : الجهاز الدوري في سمكه. يضخ الدم الفقير في الأوكسجين (اللون الغامق) بقوة الى الخياشيم، ويبقى قليل من الضغط لتحريك الدم الغني بالأوكسجين (اللون الفاتح) الى بقية أجزاء الجسم.

(Ventricle) ذو الجدار السميك العضلي. ويدفع الانقباض الشديد للبطين الدم إلى شبكة من الشعيرات موجودة في الخياشيم، وهنا يحدث عملية تبادل الغازات. ومن الخياشيم، يمر الدم إلى شبكات عديدة من الشعيرات موجودة في باقي جسم السمكة، حيث يحدث تبادل الغازات مع الأنسجة، ثم يعود الدم إلى القلب. والجهاز مقفل حيث أن الدم يكون موجوداً داخل أوعية طوال الدورة بأكملها (الشكل ٢٣-٤). والجهاز الدوري في الأسماك، والذي يبدو مناسباً لاحتياجاتها، ليس كفءً بما فيه كفاية. وكما ذكر من قبل، يوجد انخفاض واضح في الضغط عندما يسير الدم خلال شبكة الشعيرات. وفي الأسماك، بعد مرور الدم في الخياشيم، لاينتقل بقوة عن طريق قوة ضربات القلب.

٢٣-٦. ثلاث غرف: الضفدعة والسحلية:

THREE CHAMBERS: THE FROG AND THE LIZARD

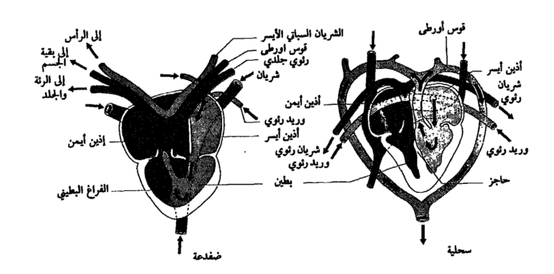
الوضع في هذه الحالة أفضل في قلب الضفدعة، اذ يتكون القلب فيها من ثلاث غرف رئيسية: أذين وبطين واحد. فالأذين الأيمن يستقبل الدم الفقير في الاوكسجين من الأوعية الدموية (الأوردة Veins) الآتية من الأنسجة والأجهزة المختلفة في جسم

الضفدعة. وينقل الدم من الرئتين الغني بالاوكسجين إلى الاذين الايسر المنفصل، ويمر الدم من الأذين إلى بطين واحد (شكل ٢٣-٥). ويدفع إنقباض البطين الدم إلى وعاء سرعان ما ينقسم إلى فرع أيمن وآخر أيسر، وكل من هذين الفرعين سرعان ماينقسم ثانية إلى ثلاثة شرايين (Arteries) رئيسية، وتحمل الشرايين الأمامية الدم إلى الرأس والمخ في الضفدعة، وتحمل الشرايين الوسطى (وهي الأقواس التقسيمية) الدم إلى الأنسجة الداخلية والأجهزة في بقية أجزاء الجسم، وتحمل الشرايين الخلفية الدم إلى الجلد والرئتين.

ومن الوهلة الأولى، قد يبدو أنه مهما كانت الميزة المتحصل عليها من رجوع الدم الفقير في الأوكسجين إلى أحد أجزاء القلب والدم الغني بالأوكسجين إلى جزء آخر، فإن تلك الميزة قد تفقد عند مزج النوعين من الدم في بطين واحد، وهذه إلى حد ما حقيقة. وعلى آية حال، فالبطين مقسم جزئياً إلى غرف ضيقة والتي يبدو أنها تقلل من مزج النوعين من الدم. وعند إنقباض البطين، فالدم الفقير في الأوكسجين ينحرف إلى الشريانين الذاهبين إلى الجلد والرئتين، وهنا يمتص الدم مدداً طازجاً من الأوكسجين، يذهب الدم الغني بالأوكسجين من الأذين الأيسر، وهو نقي نسبياً، إلى الشرايين الذاهبة إلى المخ. وفقط الدم الذاهب إلى الأقواس التقسيمية والمؤدية إلى بقية أجزاء جسم الضفدعة يكون ممزوجاً كلية، ولكن مع هذا فإنه يحتوي على أوكسجين كاف لأمداد الأجهزة التي يحمل اليها باحتياجاتها منه.

لاحظ أن المشكلة الناجمة عن إنخفاض الضغط في الشعيرات قد تم حلها بنظام الجهاز الدوري في الضفدعة، فكلا أجهزة تبادل الغازات والانسجة الدخلية في الجسم تستقبل الدم تحت ضغط كامل بسبب إنقباض البطين.

ويوجد في الزواحف تحور أكثر في القلب، ففي السحلية، يوجد حاجز (Septum) عضلي يقسم البطين جزئياً (الشكل ٢٣-٥). فعند إنقباض البطين، تقفل فتحة هذا الحاجز وعندئذ يكون البطن مقسماً كليةً إلى غرفتين منفصلتين، يمنع هذا إمتزاج النوعين من الدم. ويضخ النصف الأيسر للبطين الدم الغني بالاوكسجين (الذي وصله من الأذين الأيسر) إلى الجسم، أما عن النصف الأيمن للبطين فهو يضخ الدم الفقير في الأوكسجين (والذي وصله من الأذين الأيمن) إلى الرئتين.



الشكـل (٢٣-٥) : مقارنة بين قلب حيوان برمائي (يسار) وقلب حيوان من الزواحف (يمين). لاخلط بين الدم الفقير في الأوكسجين (لون غامق) والدم الغنى بالأوكسجين (لون فاتح) في قلب الزواحف.

٢٣-٧. أربعة حجرات : الطيور والثدييات :

FOUR CHAMBERS: BIRDS AND MAMMALS

الحـاجـز في قلوب الـطيور والثـدييات كامـل، وهـذا يزودنا بمضختين كاملتين منفصلتـين، فالأذين الأيمن يستقبل الدم الفقير في الاوكسجين (الغير مؤكسد) من الجسم ويضخ البطين الأيمن هذا الدم بقوة إلى الرئتين، حيث يفقد الدم ثاني اكسيد الكربون ويأخذ مدداً طازجاً من الأوكسجين. ويرجع هذا الدم المؤكسد إلى الأذين الأيسر، يمر إلى البطين الأيسر، ثم يضخ بقوة منه إلى الأعضاء والأنسجة الأخرى من الجسم. ومن المحتمل أنه لا يوجد أي إتفاق في أن المجموعتين الوحيدتين من الحيوانات ذوات الـدم الحـار (الحـرارة الداخلية - أنظر قسم ٢٣-٢١) هما الطيور والثدييات بأجهزتها الدورية المنفصلة، فأحد الأجهزة مسئول عن تبادل الغازات مع البيئة، بينما الآخـر مسئول عن تبـادل الغـازات مع الأنسجـة . والكفـاءة الناتجـة عن وجـود هذيـن الجهـازين الـدوريـين المنفصلين يجعل من المحتمـل حدوث المعدل المرتفـع للتنـفس الخلوي والذي يعتمد عليه النظام الحراري الداخلي (Endothermy).

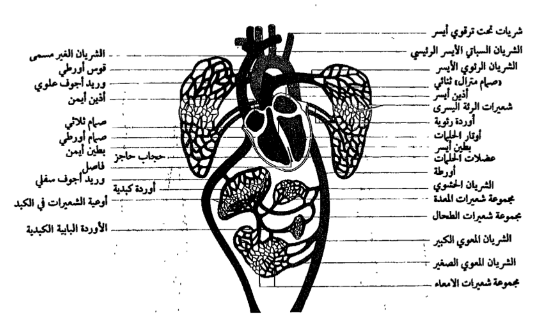
مســار الــدورة في الانســان :
THE PATHWAY OF CIRCULATIN IN HUMANS

٢٣-٨ . القلب: THE HEART

يقـع القلب تقـريبـًا في مركــز الفراغ الصـدري ويحاط بغشـاء لحمايتـه يسمى التـامـور (Pericardium) (الشكل ٢٣-٦) . ويدخـل الدم الفاسـد (الغيـر مؤكسد) من الجســم إلى الأذين الأيمــن ، ومنــه يسـير عبر الصمام الثلاثي (Tricuspid) إلى البطين الأيمن. والأسم Tricuspid يأتي من وجود ثلاث زوائد نسيجية تحرس الفتحة الموجودة بين الأذين الأيمن والبطين الأيمن. ويقفل إنقباض البطين بعد ذلك الصمام الثلاثي المذكور ويفتح الصمام الرئوي الموجود عند مدخل الشريان الرئوي (Pulmo-nary Artery) ويدخل الدم الشريان الرئوي، الذي يتفرع إلى فرع أيمن وآخر أيسر واللذين يؤديان إلى الرئة اليمني والرئة اليسرى. على التوالي. وتتفرع تلك الشرايين ثم تتفرع ثانية لتكـون الشرايين الدقيقة (Arterioles) والتي تغذى شبكة الشعيرات الرئوية بالدم. وهنا يترك الدم ثاني أكسيد الكربون ويأخذ مددا طازجا من الأوكسجين. ويتم صرف الدم الموجود في شبكة الشعيرات الرئوية عن طريق أورده دقيقة Venules والتي تعمل كروافد للأوردة الرئويــة (Pulmonary Veins). وتحمل أربعة عروق رئوية (إثنان من كل رئـة) الدم المؤكسـد إلى الأذين الأيسـر للقلـب ، وهــذا يكمـل الجزء من الـدورة الدموية المعروفة باسـم الجهاز الرئوي (Pulmonary system).

ويمـر الدم من الأذين الأيسر خلال الصمام الثنائي (Biscuspid valve) إلى البطين الأيسر. وانقباض البطين يقفل الصمام الثنائي المذكور ويفتح الصمام الأورطى الموجود عنـد مدخـل الأورطة (Aorta). وتوجد أول الفروع الأورطية خلف الصمام الأورطى مباشرة. وتؤدي فتحتـان إلى الشريانيـن التاجيين الأيمن والأيسر (Coronary Arteries) واللذين يمدان القلب نفسه بالدم.

ولو أن هذه الشرايين التاجية تنشأ من الأورطة إلا أن الأورطة مايزال داخل كتلة القلب، وتمر الشرايين التاجية مباشرة للخارج على سطح القلب وتمتد لأسفل فوقة. وتؤدي الشرايين التاجية إلى شرايين أصغر والتي بدورها تغذي شبكة من الشعيرات بالدم والتي تخترق كل جزء من القلب، وتصرف هذه الشعيرات ما بها في أوردة دقيقة



الشكل (٢٣-٦) : قلب الانسان، منظر تخطيطي لممرات الدم خلال الرئتين والأجهزة الداخلية. الـدم المؤكسـد يشاهد باللون الفاتح، والفاسد باللون القاتم. لاحظ أن الدم الخارج من المعدة والطحال والأمعاء يمر خلال الكبد قبل رجوعة الى القلب. هنا تلتقط المواد الضارة أو الزائدة من تلك الأجهزة وتستبعد.

والتي تؤدي إلى وريدين تاجيين يفرغان ما بهما في الأذين الأيمن. ويعرف هذا الجزء من الدورة الدموية بالجهاز التاجي (Coronal system).

يمكن معرفة أهمية هذا الجهاز التاجي من حقيقة أن عضلة القلب لابد من امدادها باستمرار بالأوكسجين كي تستمر في النبض. وأي شيء يتدخل في العمل المتقن للجهاز التـاجي يكون له تأثيرات فتاكة وأحيانا مميتة على الكائن. ولسوء الحظ، فان الجهاز التاجي يكون على الأخص عرضة للتلف وعدم القدرة على العمل. وتخرج الشرايين التاجية عند نقطة أعلى ضغط للدم في الدورة الدموية. والضغط المرتفع المستمر والذي يمكن أن تتعرض له تلك الشرايين التاجية تسبب كلها تلفا مبكرا لتلك الأوعية. وقد يأخذ هذا التلف شكل فقد في مرونة جدران الشرايين، التي تقلل من كمية الدم التي يمكنها أن تمر خلال الشرايين التاجية وبالتالي تنهى المدد الأوكسجيني للقلب. وكثيرا ما تتجمع رواسب دهنية على الجدر الداخلية لتلك الشرايين التاجية، فتقلل من اتساعها وبالتالي من الدم الذي يمكنها أن تحمله. وفي كلتا الحالتين، فان المدد الأوكسجيني

للقلب قد لا يكون كافيا في وقت الشدة، وينتج عن ذلك الأعراض المؤلمة المعروفة بالذبحة الصدرية (Angina pectoris).

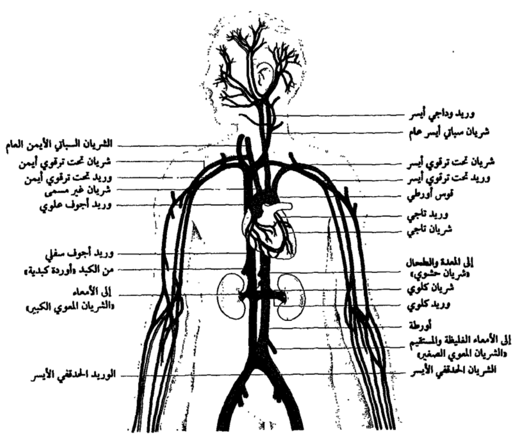
وقد تؤدي الرواسب الدهنية في شريان تاجي أو فرع منه إلى تكون الجلطات الدموية ، وتوقف هذه الكتل الصلبة سير الدم في الوعاء وشبكة الشعيرات التي تغذيها. وتسمى هذه الظاهرة بالانسداد التاجي (Coronary Occlusion) ، أو الذبحة القلبية. ويموت هذا الجزء من القلب الذي ينقطع عنه الدم بسرعة بسبب حرمانة من الأوكسجين، واذا كان هذا الجزء من القلب ليس كبيرا، فيمكن للأجزاء الباقية من القلب، بمرور الوقت، تعويض الضرر الناتج. وفي أغلب الأحوال، على أية حال، يفشل القلب ويتلو ذلك الموت. ونحو ٣٨٪ من جميع الوفيات في الولايات المتحدة الامريكية في عام ١٩٧٦م كان بسبب أمراض القلب.

٢٣-٩ . الأوعية الدموية الجهازية THE SYSTEMIC BLOOD VESSELS

يطلق على باقي الجهاز الدوري في الانسان بالجهاز الجهازي أو الجسمي، ويوضح الشكل (٢٣-٧) مسار الفروع الرئيسة لهذا الجهاز. ويمر الدم من الأورطة إلى الشرايين الرئيسية التي تؤدي إلى كل أجزاء الجسم. ويتحرك الدم بسبب القوة المتسببة عن إنقباض الأذين الأيسر. تنتقل موجة الدم التي تحدث عند كل انقباض خلال الجدر العضلية المرنة للجهاز الشرياني بأكملة، والتي يمكن اكتشافها كنبض (Pulse) ، حتى أثناء اللحظات التي يرتاح فيها القلب (الدياستول) يوجد بدون شك ضغط في الجهاز الشرياني، يزداد الضغط عند إنقباض القلب (سيستول).

واختبار ضغط الدم هو عملية اكلينيكية عادية، ويعبر عن هذا الضغط ككسر، مثل ١٢٠/٨٠، وأرقام البسط في الكسر تمثل الضغط في الدم الشرياني عند السيتسول (انقباض القلب) ، ووحدة القياس تسمى تور (Torr). وفي هذا المثال فان الضغط يعادل ذلك الذي يعطيه عمود زئبق ارتفاعة ١٢٠ مليمتر، ويمثل المقام الضغط أثناء الدياستول (عند إنفراج القلب). ولو أن ضغط الدم يختلف بكثرة في حالات معينة في الأوقات المختلفة، إلا أن الضغط المرتفع المستمر ربما يكون علامة أو سبب العديد من الأمراض.

وعند جرح أي شريان، يخرج الدم باندفاع بسبب الضغط المتسبب عن البطين



الشكل (٢٣-٧): الأوعية الدموية الرئيسية في الأنسان. الشرايين ترى باللون الفاتح، الأوردة باللون الغامق.

الأيسر، وقد يحدث نزيف حاد. ولحسن الحظ، يمكن للشرايين أن تبقى عميقة بعض الشيء في أنسجة الجسم أكثر من الأوردة، وبذلك ليس من السهولة أن يصيبها الضرر. وإذا ما حدث نزيف حاد، على أية حال، فلابد من ممارسة ضغط على الجانب المقطوع الأقرب إلى القلب.

٢٣-١٠. الشعيرات الدموية THE CAPILLARIES

إن ضغط الدم الشرياني يتشتت كثيرا بمجرد دخول الدم إلى الشعيرات. والشعيرات أوعية دقيقة جدا ويبلغ قطرها نحو قطر خلية دموية حمراء (٧,٥ ميكرون)، ولذلك فلابد لتلك الكرات الدموية أن تمر خلال الشعيرة في صف واحد. ولو أن قطر الشعيرة صغير جدا، إلا أن عدد الشعيرات التي تخرج من شريان واحد يكون كبيرا بما

فيه الكفاية لدرجة أن مساحة المقطع العرضي المهيأ لسريان الدم يزداد، ولقد قدر أنه يوجد نحو ٦٠,٠٠٠ ميل من الشعيرات الدموية داخل جسم الانسان البالغ.

وتتكون جدر الشعيرات من طبقة واحدة من الخلايا الطلائية، وخلال تلك الجدر يتم تبادل المواد بين الدم وبين الأنسجة. ولو أن شبكات الشعيرات غير ظاهرة كالقلب والأوعية الرئيسية، الا أنه في تلك الشبكات تحدث وظائف تبادل الجهاز الدوري. وبمعنى أصح، فالقلب والأوعية الدموية الرئيسية ماهي إلا أجزاء مساعدة في الجهاز الدورى، إذ أنها ببساطة تقوم بامداد الدم وكذلك إبعاد الدم من الشبكة الهائلة للشعيرات.

ولقد قدر أن مساحة السطح الكلي المطلوب للتبادل في شبكات الشعيرات تعادل ٨٠٠-١٠٠٠ متر مربع (وهي مساحة أكبر من ثلاثة ملاعب تنس مزدوجة)، وعلاوة

الشكل ٢٣-٨. توزيع الدم في جسم الانسان عند الراحة وأثناء التدريب الشاق. لاحظ الزيادة في ورود الدم إلى الأجهزة العاملة (العضد الهيكلي والقلب). وتساعد الزيادة في امدادات الدم إلى الجلد في تشتيت (تبديد) الحرارة الناتجة من العضلات. لاحظ أيضا أن إمدادات الدم إلى المخ تبقى ثابتة. ويزداد سريان الدم أثناء التدريبات بسبب زيادة سرعة ضربات القلب وزيادة حجم الدم الذي يضخة القلب في كل ضربة.

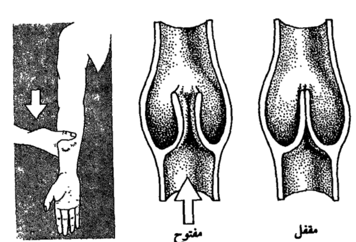
	سريان الدم / مل دقيقة	
الجهاز	عند الراحة	أثناء التدريبات الشاقة
القلب	٢٥٠	٧٥٠
الكليتان	١٢٠٠	٦٠٠
العضلات الهيكلية	١٠٠٠	١٢,٥٠٠
الجلد	٤٠٠	١٩٠٠
الأحشاء	١٤٠٠	٦٠٠
المخ	٧٥٠	٧٥٠
غير ذلك	٦٠٠	٤٠٠
المجموع	٥٦٠٠	١٧,٥٠٠

على هذا الطول وتلك المساحة المذهلة، فان شبكات الشعيرات (أو الأسرة Beds" كما يطلق عليهـا دائما) تشغل في جسم الانسان حجما كبيرا. وفي الحقيقة، فان الحجم الكمي يعادل تقريبا نفس حجم الدم (نحو ٥ لترات) في الجسم. لذلك، فإنه إذا كان لزاما أن يمتليء القلب والأوعية الرئيسية بالدم في جميع الأوقات، فانه من الواضح أن جميع الشعيرات لا يمكنها أن تمتليء فورا، وهذه في الواقع هي الحقيقة. إذ توجد إعادة توجيه مستمر لسير الدم من جهاز إلى آخر طبقا للاحتياجات المتغيرة للجسم. وأثناء التـدريب الشاق، على سبيل المثال، فان أسرة ـ Beds" الشعيرات في العضلات الهيكلية تفتح على حساب الشعيرات الموجودة في الأحشاء (الشكل ٣٢-٨)، والعكس صحيح بعد وجبة دسمة.

٢٣-١١. عـودة الـدم إلى القلـب: RETURN OF BLOOD TO THE HEART

عند ترك الدم للشعيرات ودخولة في الأورطة، يوجد ضغط بسيط ليدفعه للأمام. فالدم الموجـود في الأوردة الموجودة تحت القلب يساعـدة في العـودة إلى القلب المضخـة العضليـة (Muscle Pump)، وهذا ببساطة هو التأثير الانقباضي (Squeezing) الذي تقـوم به العضـلات النشـطة على الأورطـة الجـارية بداخلهـا. وطبعـا، هذا التأثير الانقباضي يكون عديم الفائدة اذا لم توجد بعض الوسائل لتأكيد سير الدم في إتجاه واحد، وهذه الوسائل عبارة عن جهاز من الصمامات تسمح للدم الوريدي بالسير تجاه القلب ومنعه من السير إلى الخلف. ويمكنك القيام بتجربة تلك الصمامات بنفسك بضربك بثبات الأوردة القريبة من السطح الداخلي لجبهتك. واذا ماضربت بعيدا عن القلب، فانـك ستـدفع الدم إلى الخلف ضد الصمامات. عندئذ ستقفل الصمامات ويظهر ورم عند تلك النقطة (الشكل ٢٣-٩). (وجدر الأوردة رقيقة جدا ومرنة الحركة).

ويمكن توضيح أهمية مضخة العضلات عند حدوث الاغماء لجندى بعد وقوفه انتباه لمدة طويلة من الوقت. وفقد الاحساس عند الجندى (المتسبب في اغمـائة) كان نتيجة عدم إمدادة الكافي بالدم (وبالتالي الأوكسجين) الواصل إلى المخ. وينشأ ذلك بسبب التجمع التدريجي للدم في الأرجل نتيجة لعدم تحرك عضلات الرجل. والإغماء هو



شكل (٢٣-٩): توضيح الصمامات في أوردة الذراع دفع الدم للخلف ضد صمام مقفل يسبب انبعاج الوريد عند هذا المكان.

ميكانيكية جيدة للحماية في تلك الحالات. وبتحرك الجسم من الوضع الرأسي إلى الوضع الأفقى، يصل القلب إلى نفس مستوى الأرجل، ولايحتاج دم الأرجل عندئذ للرجوع عدة أقدام ضد الجاذبية، وسرعان ماتعود الدورة الدموية ثانية إلى حالتها الطبيعية. والاغماء محتمل الحدوث بين المجندين الجدد أكثر من المجندين القدامى، فالمجندين القدامى يعلمون أن ضم الركبتين قليلا وتليين عضلات سمانة الرجل بطريقة غير ظاهرة يمنع الأغماء، وتحافظ هذه الحركات على بقاء سريان الدم الوريدي للخلف متجها إلى القلب.

عرّض بناء الطائرات السريعة جدا (بما في ذلك كبسولات الفضاء) الانسان للعديد من المشاكل الفسيولوجية للموجودين في تلك الطائرات أو الكبسولة . ومن تلك المشاكل قوة الجاذبية (أو "G") التي تشد السابح في الفضاء أو عند ترك أو الدخول في الهواء الجوى . ويمكن لقوى الجاذبية هذه عرقلة عودة الدم من الجزء السفلي للجسم الى القلب وتسبب الاغماء أو فقد الرؤية (Blackout) في وقت حرج. وأمكن حل هذه المشكلة باختراع ملابس ضد الجاذبية، إذ تملأ جدر تلك الملابس بهواء مضغوط عندما يبدأ تكون ظاهرة الجاذبية. والضغط الملقى على الجسم (وبالتالي على الأوردة الموجودة غالبا قرب السطح) تدفع الدم للخلف إلى القلب بعكس قوي الجاذبية.

ويكون سريان الدم متعادلا بسبب القوى المتواضعة المسئولة عن وجود الدم في الأوردة. ويترك الدم وريدا مقطوعاً في حالة تيار ثابت، ولهذا السبب ولأن الأوردة توجد قرب السطح، فيمكن بسهولة إكتشاف أي نزيف. ويمكن إجراء ذلك على أية حال بالضغط على جانب القطع بعيدا عن القلب.

ومن الأخطاء العامة الاعتقاد بأن الشرايين هي الأوعية الدموية التي تحمل الدم المؤكسد (الأحمر الفاتح) والأوردة هي الأوعية التي تحمل الدم الفاسد (الغير مؤكسد) (الأحمر القاتم). ولو أن هذه هي الحالة العادية إلا أنه يوجد مثال واحد شاذ عند ذلك في الانسان. هل يمكنك التفكير في كنه هذا المثال الشاذ؟ فالشرايين يجب تبعاً لذلك أن تسمى بتلك الأوعية التي تحمل الدم بعيدا عن القلب، الأوردة هي تلك الاوعية التي تحمل الدم تجاه القلب.

مكونات الدم THE COMPONENTS OF BLOOD

إن الوسط الناقل في الجهاز الدوري هو الدم. ولا ينقل الدم الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون فقط إلى ومن الأنسجة والرئتين ، ولكنه يحمل أيضا موادا أخرى خلال الجسم، وهذه المواد هي الجزيئات الغذائية (مثل الجلوكوز والأحماض الأمينية) و فضلات التمثيل الغذائي (مثل اليوريا) و أيونات الأملاح المختلفة (مثل الصوديوم Na^{+} ، الكالسيوم Ca^{++} ، الكلوريد Cl^{-} والبيكربونات HCO_3) والهرمونات. ويعمل الدم كذلك على توزيع الحرارة في الجسم . وزيادة على وظيفته في حمل المواد، يلعب الدم دورا نشطا في مقاومة مسببات الأمراض الضارة (مثل بعض البكتريا) والتي تتمكن من الدخول إلى الجسم.

ويكون الدم نحو ٨٪ من وزن الجسم، فالرجل الذي وزنه نحو ١٥٠ رطلا (نحو ٧٠ كيلو جرام) يمثل الدم به حجم ٤ , ٥ من الليترات . ولو أنه توجد الان طرق معقدة لتقييم هذه القيمة، فالطرق الحديثة تعطي نفس النتائج التي تحصل عليها عام ١٨٥٦م بواسطة عالم الفسيولوجيا العظيم بيشوف (T.L.W. Bischoff). فقد أخذ بيشوف طريقا سهلا لحل مشكلة معرفة كمية الدم الموجودة في الانسان : وذلك بالوزن الدقيق لمجرم قبل وبعد إعدامه بالمقصلة.

٢٣-١٢ . خلايا الدم THE BLOOD CELLS

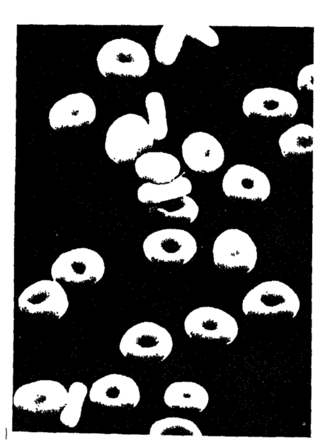
الدم هو نسيج سائل يتكون من خلايا (و أجزاء الخلايا) المعلقة حرة في بيئة مائية هي، البلازما. وتكون الخلايا وأجزاء الخلايا مايسمى بالعناصر المكونة للدم ، وهي كبيرة بما فيه الكفاية (اذ يمكن ملاحظتها تحت الميكروسكوب العادي) .

وتوجد ثلاثة أنواع من العناصر المكونة : خلايا الدم الحمراء (Erythrocytes) وخلايا الـدم البيضـاء (Leucocytes) والصفائح (Thrombocytes) أو (Platelets).

خلايا الدم الحمراء RED BLOOD CELLS

إن خلايـا الـدم الحمـراء (RBC) هي أكثـر الأنواع الثلاثة عددا، ويوجد بالمرأة العادية نحو ٤,٥ مليون من تلك الخلايا في كل ملليمتر مكعب من الدم . وفي الرجال العاديين، يكون العدد اكثر ارتفاعا : نحو ٥ مليون . وعلى أية حال، يمكن أن تتذبذب هذه القيم في مستوي كبير، معتمدة على عوامل مثل الارتفاعات التي يعيش عندها الفرد (سكان بيرو يعيشون عند إرتفاع ١٨,٠٠٠ قدم ولذلك قد تكون القيمة عندهم نحو ٨,٣ مليون) وكذلك حالة الفرد الصحية .

وخلية الـدم الحمراء شكلها مستدير (كالقرص) (الشكل ٢٣-١٠) وقطرها نحو ٧,٥ ميكرون وسمكها عند الحافة ٢ ميكرون، مركز القرص أرفع (١ ميكرون) من

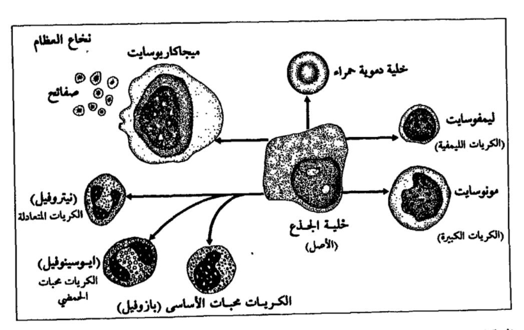


الشكل (٢٣-١٠): خلايا الـدم الحمراء كما ترى تحت الميكروسكوب الالكتروني (المسَّاح). لاحظ شكلها المحدب من كلا السطحين. (بتصريح من دكتور مارتين ي. بارنهات، جامعة ولاية وين-مدرسة الطب منشورة أصلا في طبعة ر.م. نالباندان، أشكال هيموجلوبين الخلية المنجلية، استخدامات طبية، تشارلز س. توماس، سبرنجفيلد، ٤، ١٩٧١).

الحافة، يسرع هذا الشكل المقعر من السطحين من عملية تبادل الغازات بين الخلية والبلازما.

وفي الانسان البالغ، تنتج خلايا RBCs بواسطة خلايا تسمى خلايا الجذع أو الأصل (Stem Cells) (الشكل ٢٣-١١) موجودة في نخاع العظام، وخاصة في الضلوع والاسترنة (عظام الصدر) والفقرات، وعند تكونها في أول الأمر، يكون بالخلايا الحمراء (RBCs) نواة وقليل من الهيموجلوبين. وعلى اية حال كلما نضجت خلية الدم الحمراء، تزداد كمية الهيموجلوبين في الخلية إلى أن تصل الكمية إلى ٢٨٠ مليون جزيء- مكونات نحو ٩٠٪ من الوزن الجاف للخلية، وعند نهاية تلك العملية من تخليق الهيموجلوبين تدفع النواة إلى خارج الخلية.

وعمر الخلايا الدموية الحمراء هو نحو ١٢٠ يوما، وتبتلع الخلايا الهرمة من خلايا الدم الحمراء بواسطة الخلايا الأكولة Phagocytic Cells الموجودة في الكبد وفي الطحال. ويبقى أغلب حديد الهيموجلوبين ليستخدم ثانية، أما باقي جزيئات



الشكل (٢٣-١١): خلايا الدم. تحمل خلايا الدم الحمراء الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون؛ تشارك الصفائح في التجلط، وتساعد بقية الخلايا الجسم في مكافحة العدوى. جميع خلايا الدم تصنع في نخاع العظام، ولو أن الهيموسايتات والمونوسايتات تنتج في أماكن أخرى (مثل العقد الليمفاوية) كذلك.

الهيموجلوبين فتتكسر، ومن نواتج هذه الجزيئات المكسورة - حبيبات الصفراء - التي تفـرزها الكبد في الصفراء. ولقد قدرت نحو ٣ مليون خلية دم حمراء ميتة ويكنسها الكبد والطحال كل ثانية.

يعـوض الفقـد المستمـر للخلايا الدموية الحمراء عادة بفعل نخاع العظام. وفي الحقيقة، يمكن لنخاع العظام السليم أن ينتج عند الضرورة خلايا دم حمراء تعادل أربع أضعاف أو أكثر كمية المعدل العادي للخلايا المدمرة. وبذلك فإنه بعد النزيف الحـاد (أو بعد التبرع بالدم)، يرجع نخاع العظام بسرعة محتويات الدم من الخلايا الحمراء إلى الحالة الطبيعية.

وتحت بعض الظروف، فان معدل فقد الخلايا الحمراء يزيد عن معدل تكوين تلك الخلايا، وعندما يحدث ذلك، فان تركيز الخلايا الدموية الحمراء في الدم ينخفض، وتنتج حالة أنيميا (Anemia).

خلايا الدم البيضاء WHITE BLOOD CELLS

خلايا الدم البيضـاء (WBCs) أقل بكثير في العدد من الخلايا الحمراء، والمعدل بين النوعين تقريبا ١ : ٧٠٠، ويوجد في الواقع خمسة أنواع واضحة من الخلايا البيضاء في الدم الموجود في الجسم (الشكل ٢٣-١١)، وكلها تحتوي على نواة، ويتراوح حجمها من الكـريات البيضاء الليمفاوية (Lymphocytes) والتي ليست بأكبر (١٠ ميكرون) من الـ RBCs ، إلى الكريات البيضاء الكبيرة (Monocytes) والتي تبلغ ثلاثة أضعاف حجم الخلايا الليمفاوية (٢٥ ميكرون). ويختلف شكل الخلية البيضاء خاصة أثناء وجودها بداخل الشعيرات.

والوظيفة العامة للخلية البيضاء هي حماية الجسم من الاصابة، ويقوم بذلك النوعان Neutrophils (الخـلايا المتعـادلـة)، Monocytes (الخلايا الكبيرة) بابتلاع وبالتحلل الـداخلي للمواد الغريبة (مثل البكتريا) التي تدخل الجسم. وللقيام بتلك الوظيفة، تضغط خلايا الدم البيضاء (Leucocytes) نفسها، استجابة لجاذب كيميائي، خلال جدر الشعيرات في المناطق التي حدث بها تلف للأنسجة. وبمجرد وجودها حرة في النسيج، تبـدأ عملية الالتهـام (Phagocytosis). فالبكـتريا، أو المواد الأخرى تحاط

بفراغات، وهـذه تتحد مع الليـزوسومات (Lysosomes) والتي تدمر إنزيماتها الخلايا البكتـيرية. والحبيبـات الكثـيرة في سيتـوبلازم الكريات المتعادلة (Neutrophils) هي الليزوسومات. وتنتهي المعركة عادة بموت خلية الدم البيضاء. والقيح (Pus) ماهو إلا تجمع خلايا الدم البيضاء الميتة ونواتج تلف الأنسجة.

وعمر الخلية المتعادلة قصير نسبيا، حتى في الفرد السليم، وتموت تلك الخلايا في خلال أيام قليلة. وربما تسأل لماذا تموت تلك الخلايا بسرعة إذا لم توجد عدوى نشطة مطلوب منهـا أن تكـافحها. والاجابة هي أن تلك الخلايا دائما مشغولة في مكافحة البكتيريا والموجودة دائما في أفواهنا، وممراتنا الهوائية، والأمعاء الغليظة وأماكن أخرى. وعموما، فهذه المكافحة كافية لجعلنا نتغلب على وجود هذه الأنواع من البكتيريا. وعلى أية حال، توجد أنواع من الضغوط قد تقلل وقتيا من مقاومتنا وتسمح لتلك الكائنات بغزو أنسجتنـا، والمثل الحزين لذلك هو مرض الأجرانيولوسيتوزس (Agranuc-locytosis). ففي هذا المرض، يتوقف إنتاج خلايا الدم البيضاء. والتعرض الشديد للاشعـاع أحـد الأسبـاب لهذا المرض. وبتوقف إنتاج خلايا الدم البيضاء تبدأ البكتريا التي كانت أجسامنا متحكمة فيها في التكاثر. وبعد يومين، تظهر قروح على الفم وفي الأمعاء الغليظة، أو إصـابـة شديدة بالرئتين، وتنتشر تلك الأعراض بسرعة في جميع أجزاء الجسم إن لم يبدأ العلاج باستخدام المضادات الحيوية بسرعة، وتحدث الوفاة في خلايا أيام قليلة.

ومرض الأجرانيولوسيتوزس هو أحد المخاطر الزائدة في عصرنا النووى، وهو أيضا مثـل جيد لتـوضيح أهمية الخـلايا البيضاء في الحفاظ على معاهدة صعبة مع الأنواع المختلفة من البكتريا والتي نأويها في داخل أجسامنا.

ولا تقوم الخلايا الليمفاوية بأي ابتلاع للمواد داخل السيتوبلازم (Endocytosis) ولكنها تكافح المرض بمساهمتها في تكوين الأجسام المضادة (Antibodies). والأجسام المضـادة هي بروتينات تنتج كلما دخلت جزيئات كبيرة غريبة الجسم، وتسمى تلك الجـزيئـات الغـريبـة (Antigens). فجزيئات البروتين الغريب، وعديد السكريات، والحمض النووى كلها تعمل كأجسام غريبة أي (Antigens).

والعـلاقة بين تلك الأجسام الغريبة والأجسام المضادة خاصة جدا. فكل جسم

غريب (أو أنتيجن) ينبه إنتاج جزيئات جسم مضاد قادرة على الاتحاد مباشرة مع هذا الجسم الغريب وليس مع غيرة. فعند إتحاد الجسم المضاد والأنتيجن، فالمركب الناتج المعقد له خواص مختلفة عن خواص كل من الجسم المضاد والأنتيجن. وعلى سبيل المثال، فالمركب المعقد الناتج قد يحل المشكلة، أو يمكن إحتوائه بطريقة أسهل بالخلايا التي تبتلع المواد داخل السيتوبلازم (Endocytic Cells).

والطفيل الدخيل، مثل البكتريا أو الفيروس، له جزيئات كبيرة على سطحة والتي تعتبر غريبة بالنسبة للعائل أي (أنتيجينات). والقدرة على تخليق الأجسام المضادة ضد هذه الأنتيجينات وبالتالي توقف نشاطها هو سلاح ضد غزو الكائنات المسببة للأمراض. والنتيجة هي ظهور المناعة. والدور الذي تلعبه الخلايا البيضاء الليمفاوية في الاستجابة المناعية سيتم شرحه في الباب التالي.

ونسبة الخلايا المحبة للحمض (Eosinophils) ، والمحبة للأساس (Basophils) في الدم قليلة جدا في العادة، ووظيفتها غير مفهومة تماما حتى الأن، ولو أنه يوجد دليل على أن كلا منها يلعب دورا في مقاومة المرض. فيرتفع عدد محبات الحمض كثيرا في بعض الأمراض، وخاصة الأمراض المسببة عن الديدان الطفيلية. ويزداد كذلك عدد خلايا محبات الأساس أثناء الاصابات. وعند ترك محبات الأساس للدم فانها تتحول إلى خلايا سارية (Mast Cells) ، و تنتج تلك الأخيرة في موقع الاصابة مادة الهستامين والذي يزيد من سير الدم في المنطقة . وتلعب الخلايا المذكورة (Mast Cells) كذلك دورا هاما في بعض أمراض الحساسية ، مثل حمى القش (Hay fever) وأنواع الحساسية الأخرى الناتجة عن لدغ الحشرات.

ويتم صنع كل خلايا الدم البيضاء في نخاع العظام، ونادرا ما تصبح خلايا رائدة سرطانية، وكنتيجة لذلك ، فان عدد نوع واحد من الكريات البيضاء يصبح أكبر بكثير عن المعتاد ، وهي حالة تعرف بسرطان الدم (Leukemia) ، ويتبع ذلك أنواع من الأعراض الضارة (ومنها أنيميا حادة) وفي بعض أشكال المرض يمكن للعناية الطبية الابطاء من تفاقم الأعراض واطالة حياة المريض إلى عدة سنوات.

الصفائح PLATELETS

الصفائح هي بقايا خلايا ناتجة عن خلايا كبيرة (ميجاكاريوسايتات –

(Megakaryocytes) في نخـاع العظام. والصفائح شكلها كالقرص وأصغر كثيرا (٢ ميكرون) من خلايا الدم الحمراء. ويوجد عادة مابين ١٥٠,٠٠٠ إلى ٤٠٠,٠٠٠ صفيحة في كل ملليمتر مكعب من الدم. والصفائح هامة في عملية تجلط الدم.

٢٣-١٣ . البلازمـــا THE PLASMA

يسمى السائل الذي تعلق فيه خلايا الدم بالبلازما والذي يكون لونه كلون القش. والمكـونـات الأساسية للبلازما هي الماء (الشكل ٢٣-١٢) المذاب فيه مجموعة كبيرة مختلفـة من الجزيئات والأيونات، وهذه تضم الجلوكوز وهو المصدر الاساسي للطاقة لخلايا أجسـامنـا، والأحمـاض الأمينية. وبعد وجبة غنية بالدهون، تشاهد حبيبات الدهن محمولة في البلازما. واضافة إلى الجزيئات الغذائية، توجد منتجات الفضلات الناتجة عن التمثيل الغذائي. وتوجد أيضا الفيتامينات والهرمونات في الدم، كما توجد بكثرة أيونات الصوديوم والكلوريدات . وأغلب تلـك المواد تكـون في حالـة عبور فـي الدم ، أي أنها محمولـة من مكان إضافتهـا للدم (منبـع Source) إلى مكان ابعادها عن الدم (حوض Sink). والمنابع تشمل أعضاء التبادل، كالأمعاء وأماكن الامدادات الاحتياطية في الجسم. والكبد على سبيل المثال، يخزن عددا من المواد مثل الجلوكوز ونوعين من الفيتامينات، وذلك لافرازها في الدم عند الحاجة اليها (أي بين الوجبات). وتعمل كل خلية في الجسم كحوض لمواد خاصة. علاوة على ذلك، فأعضاء التبادل، مثل الكليتين والرئتين والجلد، تبعد المواد من الدم للتخلص منها في البيئة الخارجية.

الشكل ٢٣-١٢. التركيب الكيميائي لبلازما الدم.

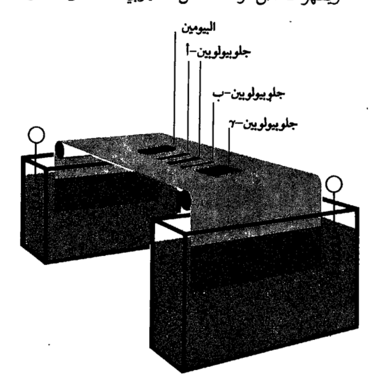
المكونات	النسبة المئوية
يد٢ أ (H_2O)	٩٠
أملاح غير عضوية	أقل من ١
بروتينات رئيسية	٧*
مواد أخرى (غذاء، فضلات، هرمونات) وغيرها	٢

* البيومين المصل ٤٪، جلوبيولين المصل ٢,٧٪، فبرينوجين ٠,٣٪.

ويتكون ٧٪ من البلازما من جزيئات بروتين، وتضم هذه الفبرينوجين (Fibrino-gen) وهــو مركب هام لعملية التجلط. فبعـد سحب الـدم من وريد والسـماح له بالتجلط، تنكمش الجلطة ببطء، وبعملها هذا ينضغط منها سائل رائق هو المصل (Serum). وهذا المصل ماهو إلا بلازما دم بدون فبرينوجين.

وتوجد طريقة سهلة لفصل البروتينات المختلفة الباقية في المصل وهي طريقة الحمل الكهربائي (Electrophoresis) ، فتوضع نقطة من المصل على لوح رقيق من مادة دعامية (الورق يعتبر مادة دعامية جيدة) والذي يكون قد سبق غمره في محلول قلوي ضعيف، ومحلول ملح مخفف. وتحت هذه الظروف تشحن كل بروتينات المصل سلبيا، ولكن يشحن بعضهـا أقوى من غيرها. وبمرور تيار مباشر خلال الورقة، وشكرا لتوصيل المحلول الملحى والذي به رطبت الورقة، تتحرك بروتينات المصل تجاه القطب الموجب (الشكـل ٢٣-١٣). وتكـون هجـرة الشحنة السالبة الأقوى على بروتين معين هي الأسرع. وبعد مدة من الوقت، ينقطع التيار، وتصبغ البروتينات لجعلها واضحة (اذ أن أغلبها عديم اللون).

ويظهر فحص لوحة الحمل الكهربي عددا من الأشرطة (Bands) الواضحة، وكل



الشكـل (٢٣-١٣): فصل بروتينات المصل بالحمـل الكهـربي. تتحـرك جزيئـات الألبيـومين بسرعة كبيرة بينما يعمل التيار. وابطأ البروتينات تحركا هي جلوبيـولينات جاما. وأغلب جلوبيـولينات جاما هي أجسام مضادة.

شريط يمثل جزيئات بروتين ذات شحنة خاصة، وأوضح تلك الأشرطة وكذلك الشريط الذي يتحرك أقرب إلى القطب الموجب هو الألبيومين في الكبد، ويعمل كوسيط لحمل جزيئات كثيرة أصغر في الدم. ولجزيء الألبيومين عدد من مواقع الربط الخاصة والتي تربط الأحماض الدهنية وحبيبات الصفراء (أنظر قسم ٢٠-١١) وبعض العقاقير نفسها بها، وتحمل تلك المواد في الدم بهذه الكيفية.

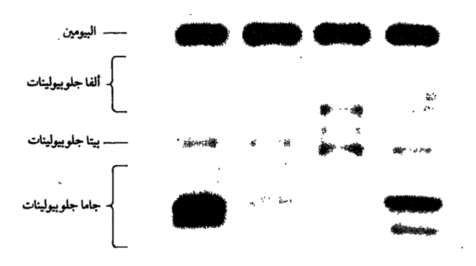
وأشرطة البروتينات الأخرى الموجودة هي جلوبيولينات (Globulins) مختلفة. والذي يهمنا هنا هي الجلوبيولينات الأقل شحنة سالبة، وهي الجاما جلوبيولينات، وهي اكثرها عند ظهور إصابة أو مناعة، وذلك لأن الأجسام المضادة، ماهي إلا جاما جلوبيولينات والتي فصلت من دم الكثير من المتطوعين وأعطيت لأشخاص معرضين لأمراض خاصة مثل التهاب الغدة النكفية أو شلل الأطفال. وبهذه الطريقة، يحصل المريض على حماية مؤقتة ضد المرض بسبب وجود الأجسام المضادة.

وظائف الدم FUNCTIONS OF BLOOD

الوظيفتان الرئيسيتان للدم هما: (١) حمل المواد (والحرارة) إلى ومن جميع أنسجة الجسم، (٢) الدفاع عن الجسم ضد الأمراض المعدية. ولقد ذكرت الوظيفة الثانية عند مناقشة خلايا الدم البيضاء وستبحث أكثر في الباب الرابع والعشرين، وتهمنا هنا الوظيفة الأولى للدم والتي ترجع إلى قوة الاذابة الكبرى للماء الموجود في البلازما والتي جعلت الدم بيئة فعالة لنقل المواد. فالجلوكوز، والاحماض الأمينية، والأحماض الدهنية قصيرة السلسلة، والفيتامينات، والهرمونات، والفضلات النيتروجينية (مثل اليوريا) وكثير من الأيونات، تنتقل كلها ذائبة في بلازما الدم. وفقط في حالة نقل الغازات لا تستطيع البلازما القيام بتلك الوظيفة وحدها، فخلايا الدم الحمراء تقوم بنقل جميع كميات الأوكسجين وثاني اكسيد الكربون.

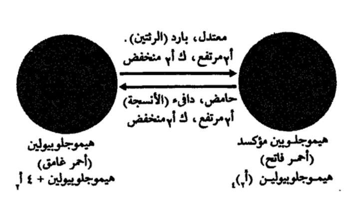
٢٣-١٤. نقل الأوكسجين: OXYGEN TRANSPORT

تكون الحبيبات الحمراء المسماه بالهيموجلوبين نحو ٩٠٪ من الوزن الجاف لخلية الدم الحمراء. والهيموجلوبين (Hb) بروتين يتكون من أربعة سلاسل عديدة الببتيدات ويلتصق بكل سلسلة منها مجموعة هيم (Heme) وفي مركز كل هيم ذرة حديد.



الشكل (٢٣-١٤): نتائج الفصل بواسطة الحمل الكهربي لبروتينات المصل من أربعة أرانب مختلفة. كل أرنب عقم بشدة بفاكسين يحتوي على بكتريا نيمونيا مقتولة. وهذا سبب الكميات الكبيرة لجلوبيولينات جاما (الواضحة بالذات في أول ورابع عينة) والتي تشاهد في أسفل. أشرطة البروتين في أعلى هي البيومين. تشاهد كذلك جلوبيولينات ألفا وبيتا.

ويتحد الأوكسجين بالهيموجلوبين، وتتحد ذرة أوكسجين مع كل مجموعة هيم، وبذلك يزيد وجود الهيموجلوبين في مجرى الدم كثيرا من كمية الأوكسجين والذي يمكن للدم أن يحملها. وعلاقة (ألفة) الهيموجلوبين بالأوكسجين هي، على أية حال، جزء فقط من قصة نقل الأوكسجين. فكثير من المواد تتحد بشدة مع الأوكسجين. والذي يجعل الهيموجلوبين عامل نافع في نقل الأوكسجين هو أنه يترك الأوكسجين ينطلق إلى الأنسجة، وبعبارة أخرى، فان التفاعل بين الهيموجلوبين والأوكسجين هو تفاعل عكسى حر (الشكل ٢٣-١٥). فتحت تأثير الحرارة، ودرجة الحموضة (pH) وزيادة ضغط الأوكسجين الموجود في شعيرات الرئتين، يتجه التفاعل إلى اليمين ويتحول الهيموجلوبين الأحمر القرمزي في الدم الوريدي إلى اللون الأحمر الفاتح للأوكسي هيموجلوبين في الدم الشرياني. وتحت تأثير الحرارة، ودرجة الحموضة (pH) والضغط المنخفض للأوكسجين الموجود في شعيرات الأنسجة، ينتج التفاعل العكسي ويتخلص الأوكسي هيموجلوبين من الأوكسجين الموجود به (الشكل ٢٣-١٦).



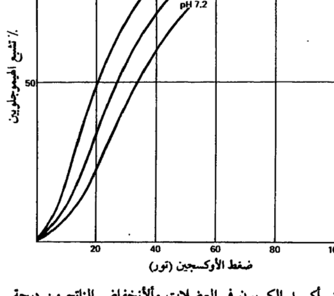
الشكل (٢٣-١٥): التفاعل المنعكس بين الأوكسجين والهيموجلوبيولين. وبدون الألفة المختلفة للأوكسجين، يصبح الهيموجلوبيولين عديم الفائدة كعامل لحمل الأوكسجين. يحمل الهيموجلوبيولين كذلك ثاني أكسيد الكربون من الأنسجة الى الرئتين.

ويحمل اللتر الواحد من الدم الشرياني نحو ٢٠٠ ملليليتر من الأوكسجين (من هذه الكمية، تحمل ٣ ملليلترات فقط في سائل البلازما، تحمل الكمية الباقية في خلايا الدم الحمراء). وفي الانسان الساكن (المستريح)، ينطلق ربع الأوكسجين فقط (٥٠ ملليليتر) إلى الأنسجة. وتضخ في كل دقيقة نحو ٥ لترات من الدم في الرجل المستريح، وبالتالي فان نحو ٢٥٠ ملليلتر من الأوكسجين تنطلق في الأنسجة في تلك الدقيقة.

وأثناء التدريب الشاق، على أية حال، فان ثلاثة أرباع الأوكس هيموجلوبين في الأنسجة ينطلق منه الأوكسجين الموجود به. علاوة على ذلك، فان قلب الرجل الرياضي المدرب قد يضخ أثناء التدريب خمسة أضعاف الكمية التي يضخها أثناء الراحة. وبذلك تزداد كمية الاوكسجين التي تنطلق إلى الانسجة إلى نحو ٣٧٥٠ ملليلتر (= ٣,٧٥ لتر) في كل دقيقة، أو أكثر ١٥ مرة من الكمية التي تتلقاها الأنسجة أثناء الراحة.

ولا يمكن تحقيق مثل هذا الأداء بدون وجود خلايا الدم الحمراء. ويمكن للتر واحد من البلازما أن يحمل ٣ ملليلتر فقط من الأوكسجين، وينطلق نحو ١,٨ ملليلتر من هذه الكمية من الأوكسجين الذائب في الأنسجة. ويبين الحساب السريع أنه إذا اعتمد الأنسان على البلازما بمفردها لنقل الأوكسجين، فإنه لزاما عليه أن يضخ ٢٨ ضعف كمية الدم في كل دقيقة، حتى أثناء فترة الراحة، ليفي بمتطلبات الأنسجة.

ويمكن توضيح أهمية الرابطة الضعيفة العكسية الموجودة بين الهيموجلوبين والأوكسجين جيدا في حالة التسمم بغاز أول أكسيد الكربون إذ أن أول اكسيد الكربون، مثل الأوكسجين، يتحد مع الهيموجلوبين، ولكن عند إتحاده هذا يمنع



الشكل (٢٣-١٦): التفاعل المنعكس بين الهيموجلوبيولين والأوكسجين، درجة الحموضة (pH) ضغط الأوكسجين في الرئتين، ٩٠-٩٥ تور، في الأنسجة الداخلية نحو ٤٠ تور. لذلك، فان كمية بسيطة فقط من الأوكسجين المحمول بخلايا الدم الحمراء هي التي تفرغ في الأنسجة. وعموما، النشاط الشديد يمكن من إنزال ضغط الأوكسجين في العضلات الهيكلية تحت ٤٠ تور، والتي تسبب زيادة كبيرة في كمية الأوكسجين التي تنطلق. ويسرع هذا التأثير بالتركيز المرتفع لثاني أكسيد الكربون في العضلات والأنخفاض الناتج من درجة الحموضة ٧,٢ وكلما أنخفض تركيز ك أ٢ (وبالتالي درجة حموضة أعلى) عند الرئتين يزيد ارتباط الأوكسجين بالهيموجلوبين وبالتالي يساعد في أخذ الأوكسجين.

ويؤثر التغير في درجة الحرارة على إرتباط الأوكسجين بالهيموجلوبين وفي الدفء النسبي للأجهزة الداخلية. ينحرف المنحنى الى اليمين (مثل منحنى pH ٧,٢ مساعدا في تفريغ أ٢ وفي البرودة النسبية للرئتين، ينحرف المنحنى الى اليسار، مساعدا بذلك في أخذ الأوكسجين.

الهيموجلوبين كذلك من إتحاده مع الأوكسجين. ولا ينطلق أول أكسيد الكربون، على أية حال فورياً من الهيموجلوبين، لذلك إذا ماتعرض شخص إلى أول أكسيد الكربون (كما في جراج مقفل وموتور السيارة في حالة دوران)، يصبح الكثير من الهيموجلوبين أكثر وأكثر غير كفء لنقل الأوكسجين. والألفة بين الهيموجلوبين وبين أول أكسيد الكربون تعادل ٢٣٠ مرة تلك الألفة الموجودة بين الهيموجلوبين والأوكسجين. وعلى ذلك، ففي هواء يحتوي على جزء واحد من الأوكسجين، ٢٣٠ جزء من أول أكسيد الكربون فان أول أكسيد الكربون يتنافس بنفس المقدار مع الأوكسجين، وفي وقت

قصير، فان نصف الهيموجلوبين في مجرى الدم يصبح غير قادر على نقل الأوكسجين. ويأخذ جلد الضحية الذي تسمم بأول أكسيد الكربون اللون الأحمر القرمزي وهو لون الهيموجلوبين عند إتحاده بأول أكسيد الكربون. وفقط فان الابتعاد السريع في الوقت المناسب من جو الوقود وإستخدام التنفس الصناعي بواسطة الأوكسجين هو الذي ينقذ حياة الضحية.

٢٣-١٥ . نقل ثاني أكسيد الكربون CARBON DIOXIDE TRANSPORT

يذوب ثاني أكسيد الكربون في الماء بدرجة أكثر بكثير من ذوبان الأوكسجين، والسبب في ذلك هو أن ثاني أكسيد الكربون يتحد كيميائيا مع الماء مكونا حمض الكربونيك:

$$ك أ_{٢} + يد_{٢} أ \rightleftharpoons يد_{٢} ك أ_{٣}$$

ثم ينفصل هذا الحمض إلى أيون الايدروجين (يد$^{+}$)، أيون بيكربونات:

$$يد_{٢} ك أ_{٣} \rightleftharpoons يد^{+} + يد ك أ_{٣}$$

فاذا ما كان كل ثاني أكسيد الكربون الموجود في دمائنا محمولا في البلازما على تلك الصورة، فان درجة حموضة الدم (pH) تقل عن مستواها الطبيعي وهو (pH ٧, ٤١) إلى نحو (pH ٤, ٥) ، وهذه الدرجة من الحموضة تكون قاتلة على الفور. وعلى أية حال، فان نحو ٥-١٠٪ فقط من ثاني أكسيد الكربون الذي تنتجه الأنسجة هو الذي ينتقل في هذا الوضع ، ويمكن لخلايا الدم الحمراء أن تقوم بنقل الباقي . ويتحد بالفعل نحو ٢٥٪ من ثاني أكسيد الكربون بالهيموجلوبين الموجود في خلايا الدم الحمراء (RBCs) ، مكونا كاربامينو هيموجلوبين (Carbaminohemoglobin). ولا يتحد ثاني أكسيد الكربون بالهيموجلوبين في نفس المكان من الجزيء الذي يتحد به الأوكسجين، ولكن يزيد إنطلاق الأوكسجين من الهيموجلوبين في الأنسجة من قدرة الهيموجلوبين على حمل ثاني أكسيد الكربون. ويحدث نفس الشيء في الرئتين، فأخذ الهيموجلوبين للأوكسجين يزيد من إنطلاق ثاني أكسيد الكربون فيه.

وتساعد خلايا الدم الحمراء في نقل ثاني أكسيد الكربون بطريقة أخرى. فعند دخول ثاني أكسيد الكربون خلية الدم الحمراء، يتحد بعض منه بالماء الموجود في الخلية، مكونا

حمض الكربونيك. ويسرع هذا التفاعل كثيرا إنزيم الكربونيك أنهايدريز Carbonic) (Anhydrase الموجود في الخلية الدموية الحمراء. (هذا الأنزيم غير موجود في البلازما وبالتالي، كما سنري، لا يوجد الكثير من حمض الكربونيك في البلازما). وتتحد أيونات الأيدروجين المنطلقة من حمض الكربونيك بعدئذ بجزء البروتين في الهيموجلوبين، وبهذا الأتحاد، فانها لاتقلل من درجة الحموضة (pH). وتأخذ غالبية الأيونات المتبقية من البيكربونات طريقها بعد ذلك إلى الخارج ثانية وتذهب إلى البلازما. وعند وصول خلايا الدم الحمراء إلى الرئتين، تنعكس هذه التفاعلات وينطلق ثاني أكسيد الكربون إلى هواء الحويصلات. ويُحمل ثلثي ثاني أكسيد الكربون المنتقل بواسطة الدم بهذه الكيفية. وبفضل هاتان العمليتان الميكانيكيتان الهامتان اللتين تؤديانهما خلايا الدم الحمراء، واللتين تمكن الانسان من نقل ثاني أكسيد الكربون بسرعة وبأمان من الأنسجة إلى الرئتين.

٢٣-١٦ . التبادل بين الدم والخلايا

EXCHANGES BETWEEN THE BLOOD AND THE CELLS

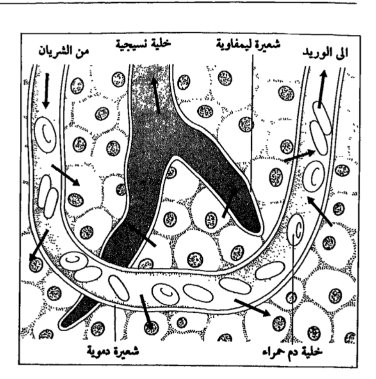
إن وسط النقل في جسم الانسان هو الدم، وجهازنا الدورى من النوع المقفل، على أية حال، ويتصل الدم إتصالا مباشرا بالخلايا، (باستثناء واحد، بالطبع، هو الخلايا الطلائية التي تبطن جدر الشرايين والأوردة وتكون جدر الشعيرات). وان عدد وتوزيع الشعيرات الدموية يكون بطريقة تجعل من المحتمل عدم وجود أي خلية على مسافة أبعد من ٥٠ ميكرون من الشعيرة (الشكل ٢٣-١٧). ومع هذا، فلابد للمواد من أن تعبر هذه الفجوة الموجودة بين الدم والخلايا، ويحدث هذا، بالقدر الأكبر، بالانتشار. وعلى أية حال فبعض مكونات الدم تنساب كذلك إلى الخارج من الشعيرات. وعند دخول الدم إلى نهاية الشريان الدقيق للشعيرة الدموية، فهو مازال تحت ضغط (نحو ٣٥ تور) الناتج عن إنقباض البطين. ونتيجة لهذا الضغط، يحدث بعض الرشح للدم خلال جدر تلك الشعيرات. وتوجد ثقوب دقيقة بين الخلايا الطلائية المكونة لجدر الشعيرات، ومن خلال هذه الثقوب يحدث رشح الدم. وتلك الثقوب من الصغر بكثير لدرجة لا تستطيع أي عناصر متكونة أن تمر خلالها (فيما عدا عند هجرة خلايا الدم البيضاء). وعلى أية حال، فان كمية لا بأس بها من الماء وبعض البروتينات الموجودة في



الشكل (٢٣-١٧): شعيرة دموية بين خليتين من عضلات القلب (١٦,٠٠٠مرة).صفوف الميتوكوندريا (M) يمكن رؤيتها بين الوحدات المنقبضة (F).لاحظ رفع الخلية الطلائية التي تكون جدار الشعيرة الدموية (C).الجسم المشاهد بداخل الشعيرة هو خلية دموية حمراء. (منقولة باذن من كيث ر. بورتر، ماري أ. بونيفيل، مقدمة للتركيب الدقيق للخلايا والأنسجة، الطبعة الرابعة، لي وفيبيجر فيلادلفيا، ١٩٧٣).

الدم تمر خلال جدر الشعيرات ثم إلى المنطقة المكونة للخلايا، أي فراغ النسيج (الشكل ٢٣-١٨). وهذا السائل، المسمى بالسائل البين فراغي (Interstitial Fluid) ماهو إلا بلازما الدم ناقصا أغلب بروتيناته. وفي فراغ النسيج، تستحم (غمر) الخلايا، ولذلك فأي مواد تكون موجودة في هذا السائل يمكنها المرور إلى داخل الخلايا بالانتشار أو بالنقل النشط. كذلك، أي مواد موجودة بكميات زائدة في الخلايا (مثل ثاني أكسيد الكربون أو الفضلات النيتروجينية) يمكنها الأنتشار للخارج في السائل البين فراغي المذكور.

وقرب نهاية الوريد في الشعيرة، يقل ضغط الدم كثيرا (نحو ١٥ تور)، وهنا، يأتي دور قوة أخرى، إذ ولو أن مكونات السائل البين فراغي مشابهة لمكونات بلازما الدم،



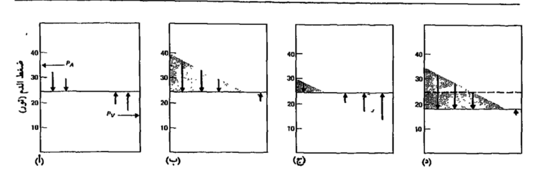
الشكل (٢٣-١٨): آلية التبادل بين الدم والخلايا. تغمر الخلايا في السائل البيني المترشح من الدم. البعض يعود مباشرة الى الدم بالانتشار في النهاية الوريدية للشعيرة الدموية، ويدخل الباقي الى شعيرة ليمفاوية، الآن يسمى باللمف، ويعود عن طريق الجهاز الليمفاوي.

فانه يحتوي على كميات أصغر من البروتينات التي يحتويها بلازما الدم، وبهذا يكون الماء في السائل البين الفراغي أكثر منه في بلازما الدم. ولأجل هذا الأختلاف، يتكون الضغط الأسموزي. فالضغط الأسموزي صغير نسبيا (نحو **٢٥** تور) ولكنه أكبر من ضغط الدم عند النهاية الوريدية للشعيرة، ونتيجة لذلك، يدخل السائل ثانية إلى الشعيرة في هذا المكان (الشكل ٢٣-١٩).

وليس من المستغرب أن نعرف أن معظم الشعيرات تتقوس حول فراغ النسيج في شكل حدوة الحصان، وبذلك يمكن للسائل المتكون عند النهاية الشريانية للشعيرة أن ينساب خلال الفراغ النسيجي، الذي يغمر الخلايا، ثم يدخل ثانية نفس الشعيرة عند النهاية الوريدية. وفي حالة عدم وجود هذا النظام، فان النهاية الوريدية لبعض الشعيرات الأخرى تكون موجودة بداخل الفراغ النسيجي نفسه.

٢٣-١٧. الجهاز الليمفاوي THE LYMPHATIC SYSTEM

من ثلث إلى ثلثي البلازما التي تدخل الشعيرات تمر في الفراغ النسيجي، ولو أن أغلب هذه الكمية المذكورة من البلازما تعود إلى نهاية الوريد في الشعيرة، إلا أن البعض لا يفعل ذلك. والكمية الصغيرة المتبقية من السائل تكون على الخصوص غنية

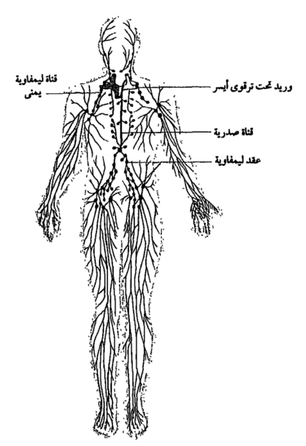


الشكـل (٢٣-١٩): علاقـات الضغط في الشعيرات. PA = ضغـط الدم عند النهايـة الشريانية للشعيـرة، Pv = ضغط الدم عند النهاية الوريدية للشعيرة. الخط الأفقى يمثل الضغط الأسموزي للدم. عندما يكون ضغط الدم أعلى من الضغط الأسموزي، يحدث رشح للسائل البيني. وعندما يقـل ضغط الـدم عن الضغط الأسمـوزي ، يعـاد أمتصـاص السـائـل البيني . (أ) الـوضـع العادي . يتـوازن الرشـح واعـادة الامتصاص . (ب) نتيجـة أتسـاع الشرايين (Pv) يزداد ويصبح الفراغ النسيجي محاطا بالسائل البيني. (ج) نتيجة أنقباض الشرايين. (PA) يقل ويسحب السائل البيني من الفراغ النسيجي. (د) نتيجـة نقص تركيز البروتين في الدم (مثل ما يحدث أثناء النقص الغذائي للبروتين طويلا). بسبب نقص الضغط الاسموزي، يتجمع السائل في فراغ النسيج (أديما).

في بروتينات المصل الذي يرشح من جدر الشعيرات، ولا ترجع هذه الكمية المذكورة ثانية إلى الشعـيرات بالانتشـار. ولحسن الحظ، لا يفقد تيار الدم هذا السائل وهذا البروتين فترة طويلة، فالسائل الزائد في الفراغ النسيجي تلتقطه أوعية دقيقة جدا تسمى الشعـيرات الليمفـاوية. والخـلايا التي تكـون جدر تلك الأوعية الليمفاوية الدقيقة لاتلتصق جيدا ببعضها البعض، وبذلك تجعل جدر هذه الأوعية مثقبه جدا. وتنشط الخلايا كذلك كثيـرا في عمليتي إبتلاع المواد داخل البلازما (Endocytosis) وكذلك في طرد المواد خارج البلازما (Exocytosis).

وحتى جزيئات البروتين الكبيرة تمر بسهولة من الفراغ النسيجي إلى داخل الشعيرات الليمفاوية [تلتقط الشعيرات الليمفاوية الموجودة في خمائل الأمعاء والتي تسمى أيضا بالشعيرات اللبنية (Lacteals) كذلك حبيبات الدهن] - (أنظر قسم ٢٠-٩).

وتؤدي الشعـيرات الليمفـاوية إلى أوعية أكـبر والتي تكـون الجهاز الليمفاوي، والأنسياب داخل الأوعية الليمفاوية بطىء نسبيا، ويحدث هذا الانسياب بطريقة مماثلة لما يحدث في الأوردة الدموية. فالنشاط العضلى يضغط على الأوعية الليمفاوية ويعصر السائل،



الشكل (٢٣-٢٠): الجهاز الليمفاوي في الانسان. أنه يرجع بروتينات بلازمية قيمة للدم ويساعد في مقاومة العدوى.

الذي يسمى الآن بالليمف (Lymph) الذي يسير للأمام، ويمكن لليمف أن يسير فقط في إتجاه واحد بسبب وجود الصمامات المتعددة.

ويسير كل الليمف المتجمع من كل الجانب الايسر للجسم، مضافا اليه الليمف المتجمع من القناة الهضمية والجانب الأيمن للجزء الأسفل، في وعاء ليمفاوي واحد رئيسي، هو القناة الصدرية (Thoracic Duct)، وتفرغ تلك القناة نحو ١٠٠ ملليلتر من الليمف كل ساعة في الوريد التحت ترقوى الأيسر (الشكل ٢٣-٢٠) ويتجمع الليمف الناتج في الجانب الأيمن من الرأس، العرقبة، ، الصدر بواسطة القناة الليمفاوية اليمنى ويفرغ محتوياته في الوريد التحت ترقوى الأيمن، وبهذه الطريقة، يعود الليمف بمحتوياته من البروتين إلى مجرى الدم.

وقد تحدث أشياء كثيرة تعوق إنتاج أو سريان الليمف، فالزيادة في ضغط الدم في الشعيرات أوالنقص في بروتينات البلازما (والذي قد ينجم عن سوء التغذية لمدة طويلة) ينشأ عنه انتاج كميات كبيرة غير عادية من الليمف (الشكل ٢٣-١٩). وقد لا يستطيع

شكـل (٢٣-٢١): داء الفيـل. اصـابة شديدة بديدان الفلاريا (نيماتودا) أتلفت الأوعية الليمفاوية لرجل واحدة لدرجـة أنها لا تستـطيـع سحب الليمف منها. والأديمـا الناتجة الحادة وسمك الجلد يسببان زيادة التشوه. تنتقل الديدان من شخص الى آخر بواسطة البعوض.

الجهـاز الليمفـاوي أن يتعـامل مع الليمف المنتج الزائد بكفاءة، ويبدأ الليمف في التجمع في الأنسجة متسببا في تمددها، وتعرف تلك الحالة بالاديما (Edema). وتوجد حالة أخرى من الأديما وهي إنسداد الأوعية الليمفاوية. فقد يحدث ذلك في المناطق الأستوائية نتيجة الأصابة بطفيل من الديدان الأسطوانية، هي دودة الفلاريا، وتسبب الأديما المعروفة بكبر بعض أجزاء الجسم كالأرجل والأذرع بشكل واضح ومتضخم، وهي حالة تعرف بداء الفيـل (Elephantiasis) (الشكل ٢٣-٢١).

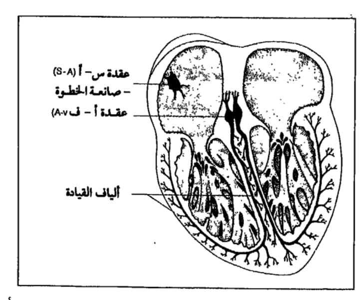
ويوجد مبعثرا عند أماكن مختلفة من الجهاز الليمفاوي (وخاصـة في خن الورك، آباط الأذرع، البطن، الذقن) عدة مئات من العقد الليمفاوية (الشكل ٢٣-٢٠)، وتحتوي هذه العقد على فراغات أو تجاويف ينساب فيها الليمف. وتبطن جدر تلك الفـراغـات بخـلايا وظيفتهـا إبتـلاع المواد داخل السيتوبلازم (Endocytic) إذ تأوى بداخلها أية مواد غريبة قد توجد في الليمف، وتحمى هذه الميكانيكية مجرى الدم من غزو البكتريا، وهي من أهم دفاعات الجسم ضد الأصابة بالأمراض. فعند التعرض لاصابة شديدة، قد تتضخم العقد الليمفاوية، وينتج عند ذلك الغدد المتضخمة. وتصنع العقد الليمفاوية كذلك الأجسام المضادة والخلايا الليمفاوية والتي تدخل بعد ذلك إلى مجرى الدم عند الأوردة التحت ترقوية.

التحكم في الدورة CONTROL OF CIRCULATION

لقد ذكرنا من قبل في هذا الباب أن كمية الدم التي يضخها القلب تزداد مع التدريبات وأن إمدادات الدم في الشعيرات يختلف من وقت لآخر وعلى مدى واسع. وليس من المستغرب أن جهازا هاما مثل الجهاز الدورى يكون مرنا في عمله لكى يقابل الاحتياجات المتغيرة للجسم، وتنشأ تلك المرونة من جهاز متكامل للتحكم.

٢٣-١٨ . القلب THE HEART

يلعب القلب نفسه دوراً هاماً في تحديد كمية الدم الممكن ضخها في زمن محدد. فأثناء الراحة، ينبض القلب نحو ٧٠ مرة في الدقيقة في الذكر البالغ حيث يضخ نحو ٥ لترات من الدم. ويوجد المنبة الذي يحافظ على هذا النظام بأكمله في القلب نفسه، إذ توجد مغمورة في جدار الأذين الأيمن كتلة من النسيج الخاص من أنسجة القلب تسمى عقدة Sino-atrial (S-A) (شكل ٢٣-٢٢). وهذه العقدة كثيرا ما يطلق عليها اسم صانعة الخطوة Pacemaker في القلب لأنها السبب في حدوث النظام (Rhythm) الأساسي والذي عنده يقوم القلب بنبضاته. وألياف عضلات القلب، مثل كل الخلايا، مشحونة شحنا موجبا على السطح وشحنا سالبا في الداخل. وفي عقدة صانعة الخطوة تتكسر هذه الشحنة على التوالي نحو ٧٠ مرة في الدقيقة، وهذا بدورة، ينبة التكسر في الشحنة في الألياف العضلية المجاورة للأذين. وتأتى موجة صغيرة من التيار



الشكل (٢٣-٢٢): تشحن صانعة الخطوة نبضات كهربائية تبدأ في أنقباض العضل. وصانعات خطوة تعمل بالبطارية تزرع الأن روتينيا في أشخاص ذوى نقص في جهازهم الكهربائي. (S-A) = شرياني-فراغي؛ A-V = شرياني-وريدي)

فوق الأذينين، مسببة إنقباضهما، وعند وصول هذا التيار إلى منطقة عازلة من النسيج الضـام موجودة بين الأذينين والبطينين، تلتقطة العقدة الأذينية – البطينية (A - V) ، ويؤدي هذا جهـاز من الألياف المتفـرعـة والتي تحمل التيار إلى جميع أجزاء البطينين واللذين بدورهما ينقبضان بشدة. وتكون كل العملية السابقة مايسمى بالانقباض (Systole) والتي يتبعها فترة إستشفاء حيث يعاد شحن عضلـة القلب والعقـدة S - A ، كما ترتخى عضلة القلب ويمتلىء الأذينان أثناء هذه الفترة والمسماه (Diastole).

ويمكن إكتشـــاف النشـاط الكهربائي للقلب بـوضع أقطاب (Electrodes) على سطح الجسم، وبعـد التكبـير، يمكن توضيحة على أشعة أنبوبة كاثود (مثل أنبوبة التليفزيون) أو، لأجل تسجيل مستديم، على قطعة ورق مربعات. ويمكننا تحليل مثل هذه الصـور الكهروكارديوجرافية (ECGs) في الغالب من امكانية التشخيص الدقيق لمدى تلف القلب بعد أي ذبحة صدرية، وذلك لأن موت جزء من عضلة القلب يمنع التوصيل الكهربائي في هذا الجزء وتغير نتيجة إعاقة البث السلسلى لنبضات القلب من ظهور الـ ECG (الشكل ٢٣-٢٢).

وتلف صانعة الخطوة لا ينتج عنها بالضرورة هبوط في القلب. وحتى بدون هذه الصانعة للخطوة، يمكن للبطينين أن يستمرا في ضرباتهما، ولو أن تلك الضربات تكون بطيئة. ويوجد على العموم خطر من أن النبضات الناشئة في البطينين قد تصبح غير منتظمة ومتفرقة. وعندما يحدث ذلك، يبدأ البطينان في الأنقطاع عن ضخ الدم. وتعرف تلك الحالة بتليف البطينين، ويتبع ذلك الموت بسرعة إلا إذا اتخذت احتياطات لبدء الضربات المنتظمة ثانية. وفي الماضي كان هذا يعني فتح الفراغ الصدري وتدليك القلب باليد. وواضح من ذلك أن هذا العمل البطولي كان منصبا فقط على حالات تليف البطينين التي تحدث أثناء اجراء عملية جراحية للمريض.

وتليف البطينين ربما يكون السبب المباشر لموت ٢٥٪ من جميع الحالات، ولو أن معظم الحالات تنشأ تلقائيا في القلوب المصابة، إلا أنه في الصدمات الكهربائية الحادة نوعـا قد يحدث مثـل هذا التليف البـطيني. ولسـوء الحـظ ، فان التيار المتغـير (٦٠-سيكل) الواسع الانتشار الآن لهو على الخصوص فعال من تلك الناحية.

ويمكن الآن إعطاء الشخص الذي يبدو وكأنه معرض لحالة التليف، بسبب ذبحة

صدرية أو لأسباب أخرى، صانع خطوة صناعي، وهو ببساطة جهاز يحدث نبضات منتظمة تنتقل بدورها إلى القلب بواسطة أسلاك دقيقة. وشكرا للصناعات الدقيقة والبطاريات طويلة العمر، إذ أمكن بذلك وضع أو زرع صانع الخطوة هذا داخل الجسم، قريبا جدا من الجلد حتى يمكن الوصول إليه عن طريق شق صغير إذا ما أردنا إصلاحة.

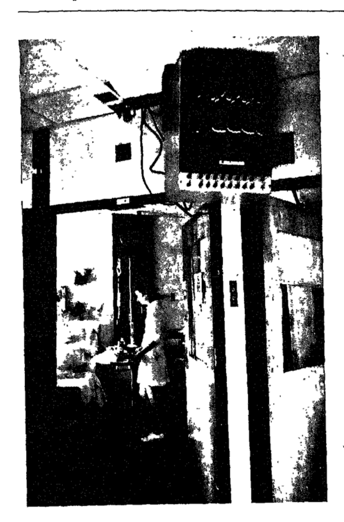
٢٣-١٩ . التحكم المساعد للقلب AUXILIARY CONTROL OF THE HEART

ولو أن صانع الخطوة هذا هو عماد النبض الرئيسي للقلب، فانه يمكن تعديل معدل وقوة النبض بعوامل أخرى. فيوجد في نخاع (Medulla) المخ مركزان إحتياطيان للتحكم، وهما يبدآن النبض الذي يذهب إلى القلب عن طريق الأعصاب.

وتسبب النبضات الذاهبة إلى القلب عن طريق الأعصاب المسرعة (Accelerator nerves) زيادة في معدل وقوة ضربات القلب وبالتالي زيادة في معدل سريان الدم في الجسم. وتنشأ هذه النبضات في القلب عند تعرض الشخص لبعض الضغوط مثل الخوف أو إجهاد جسماني عنيف. وقد يزداد نبض القلب إلى ١٨٠ نبضة في الدقيقة، وبالتالي، تزداد قوة الانقباض. وقد تزيد الكمية الكلية للدم التي يضخها القلب إلى ٢٥-٣٠ لترا في كل دقيقة. هل لاحظت بدء قلبك في الدق بسرعة عند خوفك؟ فالأعصاب المسرعة هي المسئولة عن ذلك.

ويسرع التدريب الشاق ضربات القلب بطريقتين، فكلما زاد التنفس الخلوي، تزداد كمية ثاني أكسيد الكربون في الدم وهذا ينبه مستقبلات خاصة بثاني أكسيد الكربون موجودة في الشريان السباتي والأورطة (الشكل ٢٣-٧)، وهذه تنقل النبضات إلى النخاع لارسال الاشارة بواسطة الأعصاب المسرعة إلى القلب. علاوة على ذلك، فبازدياد النشاط العضلي تسحب مضخة العضل (قسم ٢٣-١١) دماً أكثر إلى الخلف ليذهب إلى الأذين الأيمن من القلب، ويصبح هذا الأذين متمددا بالدم، وبذلك ينبه مستقبلات التمدد الموجودة في جدره، وهذه أيضا، ترسل النبضات إلى النخاع لترسل الاشارة إلى القلب. وبالعمل سويا، فان ميكانيكية هاتين الطريقتين يضمنان بذلك الوفاء بمتطلبات القلب عند الحاجة الزائدة.

ويجرى عصبان مانعان (Inhibitory) من النخاع إلى القلب، والنبضات الجارية



الشكل (٢٣-٢٣) : النشاط الكهربائي لقلوب ضحيتين من ضحايا الذبحة الصدرية يؤدي باستمرار على شاشة حرف (ت T) موضوعة على قمة فوتوجراف. والرسومات الكهربائية القلبية (ECGs) لعدد قد يصل الى ٦ مرضي يمكن اجراؤها على التوالي في وحده العناية التاجية هذه. علاوة على ذلك، شخص بجانب منذرين يمكن العمل على بدئهم انذارا اذا تغير ECG لمريض نذرا بالسوء. تم أخذ الصورة في مركز ليفين (S.A. Levin) للقلب في مستشفى بيتربنت برجهام في مدينة بوسطن (بتصريح من جون ويندي).

فيهما، وهما العصبان الحائران (Vagus nerves) ، تتسبب في إبطاء ضربات القلب. ومستقبلات الضغط موجودة في الأورطة وفي الشرايين السباتية. وعند زيادة ضغط الدم فوق المستويات العادية، ترسل هذه المستقبلات النبضات إلى الخلف للنخاع، وهذه بدورها توصل هذه النبضات خلال الأعصاب الحائرة إلى القلب، وتنتهي بذلك ضربات القلب وضغط الدم. وبذلك فان الأعصاب الحائرة تعمل ضد الأعصاب المسرعة وتحمى القلب من النشاط الزائد والغير ضروري.

٢٣-٢٠ . التحكم السطحى للدورة
PERIPHERAL CONTROL OF CIRCULATION

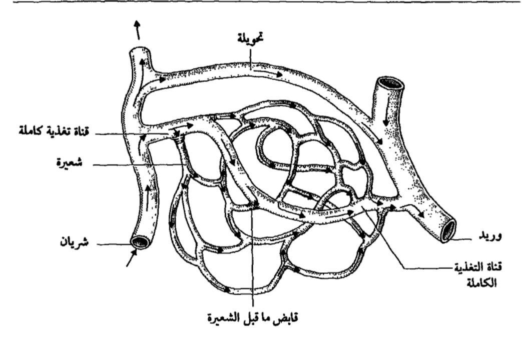
تؤثر الأعصاب كذلك على سريان الدم في داخل الشرايين، فجدر هذه الشرايين عضلية، ويقلل إنقباضها من إتساع الأوعية، وبذلك يزداد ضغط الدم ولكن تقل

سرعة سريان الدم. وانفراج الأوعية له التأثير المضاد على سبيل المثال، في أوقات الخطر أو أية ضغوط أخرى، وتنفرج الشرايين التي تغذى العضلات الهيكلية بالدم بينما يقل إتساع الأوعية التي تغذي الأجهزة الهضمية. ويحدث هذا الفعل بمنبهات عصبية وكذلك بالهورمونات، الأدرينالين، الذي يفرز داخل الدم نفسه. ومن جهة أخرى، فانه بعد وجبة كاملة، يزداد إمداد الأجهزة الهضمية بالدم على حساب إمداد العضلات الهيكلية.

واكتشفت مواد كيميائية كثيرة في الدم ، بجانب الأدرينالين ، التي تؤثر في إتساع الشرايين وبالتالي في ضغط الدم. فالغدة النخامية (Pituitary gland) والكليتان كلاهما تفرزان موادا تعمل على إنقباض الشرايين وبالتالي رفع ضغط الدم. ومن جهة أخرى، فالخلايا الموجودة في مكان إصابة أو تلف تفرز مواد، مثل الهستامين، تعمل على توسيع الشرايين وبالتالي زيادة سريان أو تدفق الدم في تلك المنطقة. وتساعد الخلايا البيضاء المحبة للأساس (Basophils) وخلايا أخرى في تلك العملية. ويبقى الكثير من الأبحاث التي يمكن إجراؤها على عمل وكذلك على العلاقات المتداخلة لتلك المواد.

ولو أن جدر الشعيرات ليس بها عضلات وبالتالي لا يمكن التحكم فيها مباشرة، فالعمل الكلي لمجموعة الشعيرات لهو تحت تحكم كامل. ويجري بين الشرايين والأوردة وعاء (Vessel) يسمى بالقناة الشاملة Thoroughfare channel (الشكل ٢٣-٢٤) الذي منه تنشأ الشعيرات الحقيقية. كما توجد حلقة من العضلات، قابضة ما قبل الشعيرات (Precapillary sphincter) عند نقطة تفرع كل شعيرة من تلك القناة الشاملة. وعند إنفراج تلك القناة، يجري الدم إلى الشعيرة، وعند إنقباضها ينقطع سريان الدم إليها. وعموما فان المنبة الذي يتسبب في إنقباض الشرايين في أي مكان من الجسم يسبب أيضا إنقباض قوابض ماقبل الشعيرات، ويحدث نفس الشيء للمنبهات التي تتسبب في إنفراج (اتساع) الشرايين.

وتوجد كذلك درجة محسوسة من التحكم الموضعي على مجموعة الشعيرات. فعندما تقوم خلايا في الفراغ النسيجي بالتمثيل الغذائي السريع، فانها تفرز موادا تتسبب في إرتخاء قوابض الشعيرات، ويعتبر ذلك ميكانيكية جيدة للتحكم لأن الخلايا التي تقوم بعمليات التمثيل الغذائي السريع تحتاج إلى إمدادات إضافية من الجلوكوز



الشكل (٢٣-٢٤): تنظيم مجموعة الشعيرات. يحدث التحكم في سريان الدم بالتغيرات في قطر الشرايين، التحويلة، قناة التغذية الكاملة. فقط جدرها عضلية.

والأوكسجين، وتحتاج كذلك إلى حمل فضلاتها بسرعة بعيدا عنها، ويعتني بهذين المطلبين بزيادة سريان الدم في الشعيرات المجاورة.

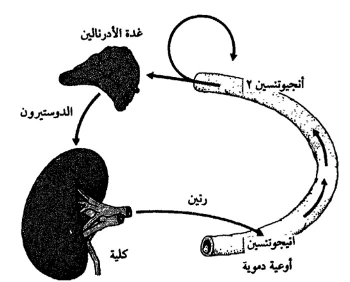
ويمكن لجميع كمية (حجم) الدم في الجسم أن تحتويه جميع الشعيرات وحدها إذا ماكانت كلها مفتوحة في نفس الوقت. وللحصول على ضغط وسريان دم مناسب، فمن المهم أن تكون مجموعة الشعيرات مفتوحة في جزء واحد من الجسم ومغلقة في الجزء الاخر، وتحت حالات قليلة، قد لا يحدث ذلك، إذ أن بعض العقاقير، والألم، وحتى الصدمات العاطفية، قد تتسبب في تمدد جميع الشرايين وفتح الشرايين في الجسم بأكمله. ولو أن حجم الدم يبقى عاديا، فان ضغط الدم يقل بشدة وقد يصاب الضحية بصدمة (Shock)، فإذا ماوضع الضحية في وضع أفقى، يستمر المخ والقلب في تلقى كميات كافية من الدم وتكون فرصة الشفاء ممتازة. وإذا ما وضعت الضحية في وضع رأسي، على أية حال، فان الضحية ستموت بسبب نقص الأوكسجين في المخ والقلب وقد يكون هذا هو الموت بالتعذيب.

ويمكن للصدمة كذلك أن تحدث بسبب النزيف الحاد. ويمكن للقلب أن يضخ فقط مقدارا من الدم يماثل المقدار الذي يتلقاه. فاذا رجعت إلى القلب كمية غير كافية،

فان مايضخة القلب (وبالتالي ضغط الدم) يهبط. وتفشل الأنسجة، خاصة في المخ والقلب، في تلقى الكميات الكافية من الأوكسجين والجلوكوز. وللتغلب على آثار النزيف الحاد، تنقبض الشرايين وتقفل مجموعة الشعيرات (فيما عدا في المخ والقلب)، ويقلل هذا من حجم الجهاز ويساعد في البقاء على ضغط الدم الطبيعي. وفي الجلد، قد يراوغ سير الدم في مجموعة الشعيرات، إذ أن أطوال الأوعية، وهي عادة مغلقة، تهيء الاتصال المباشر بين الشرايين والأوردة، وهذه التحاويل يمكنها تمرير الدم الشرياني مباشرة إلى الأوردة وبذلك تسرع من مرور الدم للخلف إلى القلب (الشكل ٢٣-٢٤).

والفقاريات التي تتنفس الهواء وتقضى وقتا طويلا تحت الماء (مثل كلاب البحر وطيور البطريق (Penguins) والسلاحف والتماسيح) تستخدم وسيلة (ميكانيكية) مشابهة للتأكد من أن إمدادات الأوكسجين للقلب والمخ لا تقل بصورة خطرة. فعند غطس الحيوان، تقل بشدة إمدادات الدم لبقية أجزاء الجسم، بحيث يكون الأوكسجين المتبقى في الدم كافيا للأجهزة التي هي في حاجة اكثر اليه: القلب والمخ. ويمدنا تشريح قلب السلحفاة المائية بجهاز ميكانيكي إضافي يساعد في هذا التعادل (التوافق). فبينما تكون السلحفاة تحت الماء، تدخل كمية كبيرة من الدم في الجانب الأيمن من البطن وتمر خلال فتحة الحاجز (أنظر الشكل ٢٣-٢٥) وترجع ثانية إلى الأجزاء الحيوية (مثل المخ) في الجسم. وبعمل هذا، يتفادى الدم الرئتين، التي تصبح أقل فائدة على أية حال إذ أن الأوكسجين بها يكون قد إستنفذ.

وفي الثدييات، تكون الكلية مسئولة عن تنظيم ضغط الدم وتهيء العمل التصحيحي إذا ما بدأ ضغط الدم في الهبوط. ويمكن للكلية عمل ذلك بافرازها إنزيم هضم البروتينات المسمى رنين (Renin) والذي له تأثير خاص جدا. وأساس هذا الانزيم هو جلوبيولين يسمى أنجيوتنسينوجين ٢ (Angioten-sinogen) موجود في البلازما. ويفتت الرنين ببتيد (يحتوي على ١٠ أحماض أمينية)، يسمى أنجيوتنسين (١) (Angiotensin 1) الذي يمكنه أن يؤثر عليه بانزيم الببتيديز الموجود في البلازما. والناتج النهائي هو ببتيد صغير يحتوي على ثمانية أحماض أمينية ويسمى أنجيوتنسين (٢) (Angiotensin 11). ويسبب أنجيوتنسين (٢) إنقباض الجدر العضلية للشرايين، وهذا يسبب قفل الشعيرات، وباعادة حجم دم الأوعية



الشكل (٢٣-٢٥): تنظيم ضغط الدم بواسطة الكلية. يسبب انجيوتنسين ٢ أنقباض الأوعية الدموية، وبذلك يرفع ضغط الدم. الدوستيرون هورمون يزيد اعادة أمتصاص الصوديوم والماء بواسطة أنابيب الكلية. وهذا التأثير، أيضا، يرفع ضغط الدم.

الفعالة إلى توازنها مع حجم الدم، تسترجع ضغط الدم الطبيعي (الشكل ٢٣-٢٥).

وللأنزيم أنجيوتنسين (٢) تأثير آخر على حجم وضغط الدم، فتوجد فوق كل كلية غدة صماء هي غدة الأدرينالين (Adrenal gland) فعند وصول الأنجيوتنسين (٢) إلى خلايا الجزء الخارجي لغدة الأدرينالين، تجعل تلك الخلايا تفرز هرمون الألدوستيرون (Aldosterone)، ويعمل الألدوستيرون مباشرة على أنابيب الكلية، مسرعا إعادة إمتصاص أيونات الصوديوم (Na^+) وهذا بدوره يسرع إعادة إمتصاص الماء وبذلك يساعد في الحفاظ على حجم وضغط الدم.

٢٣-٢١. نقل الحرارة THE TRANSPORT OF HEAT

إضافة إلى دورة في نقل المواد، فإن الجهاز الدوري مسئول عن توزيع الحرارة بجميع أجزاء الجسم، وهذا حقيقي بالنسبة إلى الحيوانات ذوات الدم الحار وكذلك الحيوانات ذوات الدم البارد. ويطلق إسم ذوات الدم الحار على الطيور والثدييات إعترافا بالحقيقة بأنها يمكنها، دائما ماتفعل ذلك، الاحتفاظ بحرارة جسمها أعلى من الحرارة المحيطة بها. ولكن ليست هذه هي الحقيقة دائما، فبعض تلك الحيوانات تسمح لحرارتها أن تنخفض إلى الحرارة المحيطة بها، عندما تدخل في بياتها الشتوى على سبيل المثال. وبعضها مثل الثدييات الموجودة في مناطق السفانا الاستوائية، على سبيل المثال - لابد من أن تحتفظ بحرارتها أقل من الحرارة الشديدة التي تعيش فيها. وعلى أية حال، توجد

ظاهرتان تميزان الطيور والثدييات عن باقي المملكة الحيوانية.

١ ـ تحتفظ الطيور والثدييات بحرارة أجسامها بداخل حدود ضيقة مهما كانت درجة الحرارة المحيطة، ولهذا السبب توصف تلك الحيوانات بأنها ثابتة التنظيم الحرارى أي لا تتغير حرارة أجسامها (Homoeothermic) (بعكس الحيوانات ذوات الدم البارد والتي يمكنها من أن تغير من حرارة الجسم والتي تسمى (Poikilothermic).

٢ ـ تعتبر الطيور والثدييات ذاتية أو داخلية التنظيم الحرارى (Endothermic) أي، أن الحرارة التي بها تحتفظ بحرارة أجسامها تتولد داخل أجسامها. وبعض الحيوانات ذوات الدم البارد، مثل السحالي التي تتعرض أجسامها إلى الشمس، تولد درجة حرارة مرتفعة لأجسامها مثل الطيور والثدييات، ولكنها خارجية التنظيم الحرارى، ، أي، تؤمن الحرارة للقيام بذلك خارجيا (من الشمس).

والمنبع الأساسي للحرارة في الحيوانات داخلية التنظيم الحرارى هو التمثيل الغذائي الجاري في الأجهزة الداخلية. فنحو ثلثى الحرارة المتولدة في الانسان المستريح تنشأ بواسطة أجهزة الصدر والفراغات البطنية وبالمخ (والذي يساهم بنحو ٦١٪ من الحرارة الكلية وهو نفس المقدار الذي تولدة جميع العضلات الهيكلية عندما تكون في حالة راحة).

وتوجد عدة إحتياطات يمكن للحيوان الداخلي للتنظيم الحرارى أن يأخذها عندما يبدأ في فقد الحرارة للبيئة المحيطة به أسرع مما يمكنه أن يولد الحرارة (عندما يبدأ الجو في البرودة)، وتلك الاحتياطات هي:

١ ـ يمكن للحيوان أن يزيد من معدل التمثيل الغذائي لأنسجتة، فكثير من الثدييات تزيد من معدل تمثيلها الغذائي عندما تبدأ الأجزاء المحيطة بها في أن تصبح أبرد، ولكن مازال هذا الرأي قابلا للجدل فيما إذا كان في إمكان الانسان أن يفعل ذلك.

٢ ـ يمكن للحيوان أن يزيد من نشاطه الطبيعي، فعند الراحة، تساهم العضلات بمقدار بسيط (نحو ١٦٪) لحرارة الجسم، ولكن أثناء التدريب الشاق على أية حال، يمكن للحرارة المتولدة من العضلات النشطة أن تزيد من الانتاج الكلي

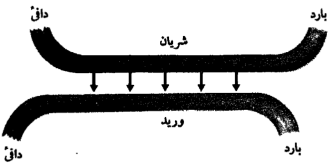
لحرارة الجسم بصورة واضحة. وفي غياب نشاط العضلات الارادية، يحدث نفس التأثير بالرعشة.

٣ ـ كلما زادت نسبة السطح إلى الحجم لأي جزء من أجزاء الجسم، كلما زادت سرعة نقل هذا الجزء للحرارة إلى البيئة المحيطة به. لذلك فانك أول ماتشعر بالبرد يكون ذلك في اليدين والقدمين، إذ أن فقد الحرارة من تلك الأطراف يمكن خفضها بورود الدم إليها. فعند البرودة الشديدة، على سبيل المثال، يمكن لورود الدم إلى الأصابع أن ينخفض إلى ١٪ أو ما يعادل ذلك من القيمة العادية.

ويستغل الكثير من الحيوانات (ومنها الانسان) الجهاز الدورى بطريقة أخرى لمنع حدوث فقد غير مستحق في الحرارة، فالشرايين في أذرعنا وأرجلنا تسير موازية لمجموعة من الأوردة العميقة. فعند مرور دم دافيء لأسفل في الشرايين، يعطى هذا الدم جزءا من حرارته إلى الدم الأبرد الراجع من الاطراف في تلك الأوردة. ويطلق على مثل هذه الميكانيكية إسم التبادل الحرارى للتيار المضاد (Counter -current heat ex-changer) (الشكل ٢٣-٢٦). وعندما لا يسبب فقد الحرارة أية مشكلة، فان معظم الدم الوريدي في الأطراف يرجع عن طريق الأوردة الموجودة قرب السطح.

وتعمل متبادلات التيار المضاد الحرارى بكفاءة ممتازة في بعض الحيوانات. فطائر النورس (Seagull) على سبيل المثال، يمكنه الحفاظ على درجة حرارة عادية في ريشة بينما يكون واقفا بقدمه الغير محمى في مياه متجمدة.

ولقد لاحظنا سابقا في نفس هذا الباب، أن الدم الذي يضخة قلب سمكة يمر مباشرة إلى الخياشيم، ولا تساعد المساحة الكبيرة السطحية للخياشيم في سرعة تبادل الغازات فقط، ولكن أيضا تجعل مما لا مفر منه أن تكون حرارة الدم الذاهبة إلى بقية



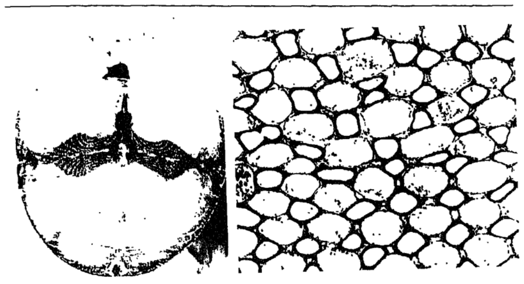
الشكل (٢٣-٢٦) : عمل التبادل الحرارى للتيار المضاد.

أجزاء الجسم مثل حرارة المياه المحيطة. ويمكن لبعض الأسماك البحرية (مثل التونة) الاحتفاظ بأهم عضلاتها نشاطا في السباحة في درجة حرارة أدفأ من درجة حرارة البحر وذلك باستخدام المتبادل الحرارى للتيار المضاد السابق ذكرة، حيث يمر الدم الشرياني البارد والغني بالأوكسجين بداخل سلسلة من الشرايين الدقيقة أو التي تأخذ الدم إلى تلك العضلات النشطة، كما تقع تلك الشرايين الدقيقة جنبا إلى جنب مع الأوردة التي تأخذ الدم الفاسد من تلك العضلات النشطة (الشكل ٢٣-٢٧). لذلك، فبينما يمر الدم البارد إلى العضلات النشطة هذه، فانه يلتقط الحرارة التي تكون قد تولدت بتلك العضلات وتحفظها من الضياع في البيئات المحيطة. وشكرا لظاهرة التبادل الحرارى للتيار المضاد، إذ تمكن سمكة التونة التي تسبح شتاء في أن تحافظ على نشاط عضلات العوم بها والتي تكون درجة حرارتها أدفأ ١٤°م من الماء المحيط بها.

ويمكن للجهاز الدورى كذلك أن يقوم بعمليات يمكن للحيوان أن يقوم بها إذا ما إرتفعت درجة حرارة الجو كثيرا. وفي تلك الحالة، يزداد توارد الدم إلى السطح والأطراف، للتمكين من فقد الحرارة بطريقة أكثر كفاءة إلى البيئات المحيطة. فاذا كان هذا غير كاف، يمكن للحيوان أن يبخر الماء من دمة - في صورة عرق في تلك الحيونات التي بها غدد عرقية، فبخر جرام واحد فقط من الماء يمتص نحو ٥٨٠ سعرا حراريا.

ولا يمكن لأغلب الثدييات تحمل إرتفاع في درجة حرارة الجسم أكثر من خمسة درجات مئوية (٥ °م) أو مايقارب ذلك. والمخ هو أهم عضو قابل للتلف نتيجة لارتفاع الحرارة. وبعض الثدييات - الكلاب، على سبيل المثال، عندها جهاز تبادل حرارى للتيار المضاد موجود بين الشرايين السباتية والأوعية التي توزع الدم إلى المخ. ويحول هذا المتبادل الحرارى بعضا من حرارة الدم الشرياني إلى الدم الوريدي الأبرد نسبيا والعائد من الأنف والفم، وبذلك يرطب الدم الشرياني قبل وصولة إلى المخ. ولقد تم شرح هذا الجهاز بالتفصيل في مقالة للعالمة مارى آن بيكر (Mary Ann Baker) في نهاية هذا الباب.

ويتحكم في تغيير سريان الدم عند الحاجة للحفاظ على الحرارة الذاتية المستقبلات الحرارية الموجودة في المخ، وسنتناول هذا الثرموستات بالتفصيل فيما بعد في الباب الثامن والعشرين.

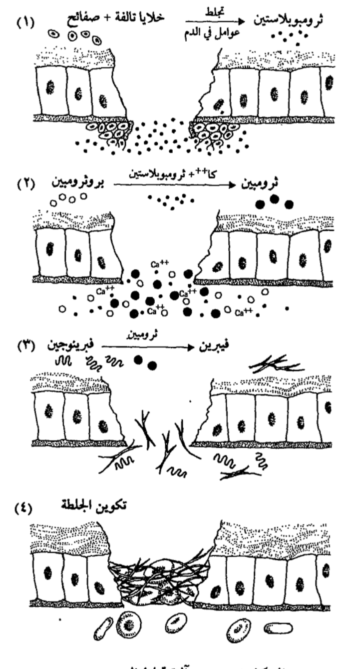


الشكل (٢٣-٢٧): يسار: قطاع عرضى في Skipjack tuna.العضل الغامق على كلا جانبي العمود الفقرى يتم الحفاظ عليه في درجة حرارة أعلى من بقية السمكة بفضل المغير الحرارى للتيار المضاد. يمين: صورة دقيقة لقطاع عرضى خلال مغير الحرارة. لاحظ التجمع المتوازي المتلاصق للشرايين (جدر سميكة) والأوردة (جدر رقيقة). (بتصريح من ي. ر. ستيفانز، قسم الحيوان، جامعة جولف، أونتاريو، كندا).

٢٣-٢٢. تجلط الدم CLOTTING OF BLOOD

عندما تنقطع أو تنفجر الأوعية الدموية، فمن الأهمية بمكان إيقاف فقد الدم من الجهاز الدوري قبل حدوث الصدمة والتي تعقبها الوفاة. ويمكن حدوث تجمد، أو تجلط، الدم في الأوعية الرئيسية، فبسريان الدم إلى الخارج من وعاء متضرر، تلتصق الصفائح الدموية بالسطح الداخلي لجدار الوعاء. وتفرز الصفائح والخلايا المتضررة في المنطقة مادة دهنية والتي يتم تنشيطها بواسطة بروتينات معينة (عوامل التجلط) في الدم لتكوين مـادة الثرومبوبلاستين Thromboplastin"، وفي وجود أيونات الكالسيوم وعوامل إضـافية أخرى للتجلط في الدم، يقوم الثرومبوبلاستين بتحويل البروثرومبين (سيرم جلوبيولـويـن يصنـع باستمرار بواسطة الكبد) إلى ثرومبين. والثرومبين إنزيم يقوم بتحويل بروتين البلازما الذائب والمسمى فبرينوجين إلى بروتين غير ذائب هو الفبرين (Fibrin)، وبالتدريج يكـون الفبرين نسيجا شبكيا تتعلق به خلايا الدم بالتدريج، وسرعان مايتكون سد (الجلطة) يوقف فقد الدم من الوعاء المتمزق.

ولم يتم فهم الخـطوات المختلفـة في عملية التجلط جيدا حتى الآن، ولا يوضح



الشكل ٢٣-٢٨ : آلية تجلط الدم.

الشكل (٢٣-٢٨) إلا صورة عامة لعملية التجلط. وقد يؤدي أي نقص لأي مكون في العملية، مثل الصفائح الدموية، عامل التجلط في البلازما، أو البروثرومبين، إلى نزيف حاد داخلي أو خارجي حتى في الجروح الصغيرة مثل قطع بسيط أو إنشقاق في الأوعية الدموية الصغيرة بسبب كدمة.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

ان بيئة كل من الثلاثة تريليون خلية والتي يتكون منها جسمنا هي بيئة سائلة . وهذا السائل، السائل البين فـراغي (Interstitial Fluid) ، وكذلك الدم، يصنعان (ECF) الجسم . ولو أن هذا السائل البين فراغي ربما يكون أقل وضوحا في جهازنا الدورى عن الدم ، الا أن هذا السائل هو البيئة الداخلية التي تعيش فيه خلايانا الحية . ويصنع هذا السائل من الدم ، على أية حال ، ويعود ، بعد ان يغرق الأنسجة ، إلى الدم . وأي تغيير في الخواص الكيميائية والطبيعية للدم ينتج عنه على الفور تغييرات مماثلة في السائل المـذكور. وتم في الأبواب القليلة السابقة مناقشة عدة آليات تعمل على الابقاء على تركيب كيميائي ثابت وغـير متغـير (وكـذلك على حالة طبيعية ثابتـة) فـي الـدم . ويمكـن الحفـاظ على الثبـات الـدائـم للحـرارة ، درجـة الحموضـة (pH) ، تركيز الجلوبيولين، الأوكسجين، ثاني أكسيد الكربون في الدم بواسطة آليات تنظيمية فائقة الدقة . ويحافظ هذا الثبات في الدم على الحرارة الذاتية (Homeostasis) للسائل البين فراغي وبالتالي للبيئة الحقيقة ، وهي البيئة الداخلية لأجسامنا . وبالرغم من التغيرات الكبيرة في البيئة الخارجية ، في الغذاء ، في النشاط العام للجسم ، فان خلايانا تستمر في العمل تحت ظروف هي في العادة مثلى وغير متغيرة نسبيا . وسنقوم في الباب الخامس والعشرين باختبار وسائل أخرى يمكن بها الحفاظ على الحرارة الذاتية في جسم الأنسان .

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ تتحد أيونات السترات (ك$_{٦}$ يد$_{٥}$ أ$_{٧}$) مع أيونات الكالسيوم (كا$^{++}$) لتكون منتجا غير قابل للذوبان، ٢ ك$_{٦}$ يد$_{٥}$ أ$_{٧}^{\equiv}$ + ٣ كا$^{++}$ ← كا$_{٣}$(ك$_{٦}$ يد$_{٥}$ أ$_{٧}$) . لمـاذا نفترض إضـافة ولو كمية صغيرة من سترات الصوديوم أو سترات البوتاسيوم إلى الدم المتجمع للتخزين في بنوك الدم؟

٢ ــ تتبع الماء الذي تأخذه خلية دم حمراء إبتداء من مجموعة الشعيرات في إبهامك الأيمن، إلى الرئتين، ثم العودة ثانية إلى نفس مجموعة الشعيرات. أذكر كل الأوعية والصمامات والغرف التي تمر بها تلك الخلية من الدم الحمراء.

٣ ــ الأديما العامة من خواص الحالات الشديدة لنقص البروتين. كيف يمكنك تفسير ذلك؟

٤ ــ لماذا تصعب رؤية صفائح الدم المصبوغة؟

٥ ــ لماذا تنقل الشرايين في الانسان دما غير مؤكسد؟

٦ ــ ماهي كمية الدم التي يحتاج الانسان الذكر البالغ أن يضخها كل دقيقة كي يمكن أن يقابل احتياجاته من الأوكسجين أثناء تدريب شاق إذا لم يكن بدمة هيموجلوبين؟

٧ ــ لخص الآليات المختلفة والتي بها يهيىء جهازنا الدورى نفسه للوفاء باحتياجات التدريب الشاق.

٨ ــ لماذا تحتاج إلى الصمامات في الأوردة وليس في الشرايين؟

٩ ــ توجد الحبيبات الحاملة للأوكسجين في القشريات وليس في الحشرات. علل هذا الفرق.

١٠ ــ قارن بين بلازما الدم، المصل، السائل الخلوي، الليمف.

١١ ــ ماهي النسبة المئوية للهيموجلوبين في جسمك والتي يتعلق بها الأوكسجين عندما يكون ضغط الأوكسجين ٥٠ تور (Torr) ودرجة الحموضة (pH) ٧,٤ (انظر الشكل ٢٣-١٦)؟ ماذا تكون النسبة عند نفس الضغط ولكن عند درجة حموضة تبلغ ٧,٢؟

١٢ ــ ما هو ضغط الأوكسجين (مقدرا بالتور Torr) الذي تتوقع وجودة في أنسجة إنسان في حالة راحة (انظر الشكل ٢٣-١٦)؟ وماذا يكون الضغط في عضلات الرجل أثناء التدريب الشاق؟

١٣ ــ في الرسم البياني الموضح في الشكل (٢٣-١٦)، إرسم توقعاتك عن الأماكن النسبية في منحنى التشبع الهيموجلوبيني عند درجات حرارة ٣٦°م، ٣٧,٥°م، ٣٩°م.

١٤ ــ إرسم رسما بيانيا كالموجود في الشكل (٢٣-١٩) والذي يوضح البرشح والامتصاص من مجموعة الشعيرات: (أ) شخص يعاني من الجفاف الشديد، (ب) شخص يعاني من مرض إحتقان القلب (الذي يسبب اختلاط الدم في الأوردة الأجوفية والأذين الأيمن).

REFERENCES المراجع :

1. MUIR, A. R., The Mammalian Heart, Oxford Biology Readers, No. 8, Oxford University Press, Oxford, 1971.
2- MAYERSON, H.S., "The Lymphatic System," Scientific American, Offprint No. 158, June, 1963.
3- ZWEIFACH, B. W., "The Microcirculation of the Blood," Scientific American, Offprint No. 64, January, 1959.
4- SCHOLANDER, P. F., "The Master Switch of Life," Scientific American, Offprint No. 172, December, 1963. Describes how air - breathing vertebrates reduce the blood supply to all organs but the heart and brain while underwater.
5- CHAPMAN, C. B., and J. H. MITCHELL, "The Physiology of Exercise," American, Offprint No. 1011, May, 1965. Describes the mechanisms by which the human body meets the demands on the circulatory system that occur during violent exercise.
6- ADOLPH, E. F., "The Heart's Pacemaker," Scientific American, Offprint No. 1067, March, 1967.
7- NEIL, E., The Mammalian Circulation, Oxford Biology Readers, No. 82, Oxford University Press, Oxford, 1975.
8- SCHMIDT-NIELSEN, K., "Countercurrent Systems in Animals," Scientific American, Offprint No. 1497, May, 1981.
9- CAREY, F.G., "Fishes With Warm Bodies," Scientific American, Offprint No. 1266, February, 1973. How the tuna keeps its powerful swimming muscles warm by means of countercurrent heat exchange.
10- BAKER, MARY ANN, "A Brain-Cooling System in Animals," Scientific American, Offprint No. 1428, May, 1979.
11- ZUCKER, MARJORIE B., "The Functioning of Blood Platelets," Scientific American, Offprint No. 1472, June, 1980.

CHAPTER 24 — الباب الرابع والعشرون

THE IMMUNE SYSTEM — الجهاز المناعي

INTRODUCTION	مقدمة :	٢٤-١ .
CELL-MEDIATED IMMUNITY	المناعة المتسببة عن وسيط خلوي :	
HUMORAL IMMUNITY	المناعة عن طريق السائل الجسمي :	
THE STRUCTURE OF THE IMMUNE SYSTEM	تركيب الجهاز المناعي :	٢٤-٢ .
THE STRUCTURE OF ANTIBODIES	تركيب الأجسام المضادة :	٢٤-٣ .
THE INTERACTION OF ANTIBODIES AND ANTIGENS	التفاعل بين الأجسام المضادة والأجسام الغريبية (الأنتيجينات) :	٢٤-٤ .
ANTIGENS	الأجسام الغريبة (الأنتيجينات) :	٢٤-٥ .
HOW ARE ANTIBODIES ELICITED	كيف تظهر الأجسام المضادة :	٢٤-٦ :
THE SECONDARY RESPONSE	الأستجابة الثانوية :	٢٤-٧ .
THE GENETIC BASIS OF ANTIBODY DIVERSITY	الأساس الوراثي لتنوع الأجسام المضادة :	٢٤-٨ .
TRANSPLANTATION AND THE UNIQUENESS OF THE INDIVIDUAL	زراعة الأنسجة وخصوصية الفرد :	٢٤-٩ .
CANCER AND IMMUNE SURVEILLANCE	السرطان والحد من تكاثرة المناعي :	٢٤-١٠ .
ALLERGIES	أمراض الحساسية :	٢٤-١١ .

CHAPTER SUMMARY	ملخص الباب
EXERCISES AND PROBLEMS	تمارين ومسائل
REFERENCES	المراجع

الباب الرابع والعشرون
الجهاز المناعي

٢٤-١ . مقدمة INTRODUCTION

كان الناس يدركون منذ عدة قرون أن بعض الأمراض لاتصيب نفس الشخص مرة ثانية، وكان يمكن لأحد الناجين ذو البشرة المجدرة Pockmarked من وباء الجديرى أن يتعامل مع المرضى في وباء لاحق. ونتيجة لتقلص هذا المرض، حدثت بعض التغيرات داخل الجسم جعلت هذا الشخص من الآن فصاعداً منيعاً ضد المرض.

ويمكن توضيح الأستجابة المناعية بأحدى أو بكلا الآليتين، فبعض الأستجابات المناعية تحمل بواسطة الخلايا الحية ، وهو نوع خاص من الخلايا الليمفاوية، ويطلق على مثل هذه الأستجابات بالواسطة - الخلوية (Cell-mediated) ، وتحمل إستجابات مناعية أخرى بواسطة جزيئات بروتينية تسمى بالأجسام المضادة (Antibodes). وتحمل الأجسام المضادة في الليمف وبلازما الدم، ولهذا السبب، فالأسم "Humoral" (أي السائل الجسمى) غالبا ما يستخدم لوصف الاستجابات نتيجة وجود أجسام الجسم المناعية.

المناعة المتسببة عن وسيط خلوي CELL-MEDIATED IMMUNITY

يطلب الكثير من الولايات المتحدة الأمريكية فحص الأساتذة والمدرسين (من بين آخرين) دورياً بمرض السل الذي تسببة البكتيريا *Mycobacterium*

tuberclosis والمسماة عادة باسيلس السل. وفي أغلب الحالات، تهاجم البكتيريا الرئتين وتأخذها سكناً لها. والمرض مزمن، وقد تعيش الكبتيريا داخل الرئتين لعدة سنوات. ويتسبب وجود البكتيريا في ظهور إستجابة مناعية والتي، لسؤ الحظ، لا تشفى المريض عادة، ولكنها تجعل من الممكن إجراء إختبار سريع غير مكلف للسل يسمى إختبار مانتـوكس (Mantoux test). وفي هذا الأختبـار، تحقن كمية بسيطة جدا من بروتـين مستخرج من باسيلس السل في الجلد، فإذا ما كان الانسان يأوى، أو كان يأوى من قبل، الباسيلس، ينتج إختبار موجب، ففي خلال ٢٤ ساعة تنشأ بثرة صلبة حمراء عند موقع الحقن. فأذا ما نزعت جزء من هذه البثرة وأختبرتها تحت الميكروسكوب العادي لوجدتهـا ممتلئة بالخلايا الليمفاوية (Lymphocytes) والخلايا الكبيرة المسماة (Mac-rophages) ويظهر التعرض لباسيلس السل إستجابة مناعية متماثلة في خنازير غينيا. علاوة على ذلك، فأن حقنة من الخلايا الليمفاوية من شخص عنده مناعة (متطوع ذو إستجابة موجبة لأختبار مانتوكس (Mantoux) في خنزير غينيا تجعلة موجب الأستجابة لأختبار مانتوكس، ولكن حقنة من سيرم هذا الشخص في خنزير غينيا لا تظهر أي إستجابة موجبة للأختبار المذكور. وفي الحقيقة، لا يمكن للأجسام المضادة أن تكتشف في الحيوانات المنيعة. والقدرة على نقل الأستجابة المناعية بحقنة خلايا ليمفاوية تؤهل تلك الخلايا الليمفاوية على أن تكون وسيط - خلوي إستجابي.

ولو أن مناعة الوساطة - الخلوية لاتفيد الضحية كثيرا في حالة مرض السل، فأن تلك المنـاعة ذات الوساطة - الخلوية هامة ضد الأمراض التي تسببها الفيروسات، فالأفراد الذين عندهم نقص في فرع الوسيط - الخلوي لجهازهم المناعي يكونوا أشد عرضة للأصابة بالفيروسات. ويعتقد بعض علماء المناعة أن مناعة الوساطة الخلوية قد تكون أيضا دفاعا هاما ضد السرطان (أنظر قسم ٢٤-١٠).

المناعة عن طريق سوائل الجسم HUMORAL IMMUNITY

فـي البـاب الثاني عشـر عرفنـا أن النيموكوكسـي (Pneumococci) هي المسبب الـذي يحدث مرض النيمـونيا البكتـيرية، وتـوجـد بكمية كبـيرة في أشكـال مختلفـة (١، ٢، ٣، وغيرها). والشخص الذي ينجو من النيمونيا من الشكل (٣) يصبح فقط منيعا للنيمونيا من الشكل (٣). فأذا ما جقن الأنسان الشكل (٣) مرة أو مرتين

داخل مجرى الدم (وهو ليس بالبيئة المعتادة للبكتيريا) في الفأر، تتكاثر البكتيريا بسرعة ويموت الفأر بسبب التسمـم الدموى (سبتيسيا Septicema). وعلى أية حال، إذا ما حقنت كمية صغيرة من سيرم دم إنسان ذو مناعة مع مئات بل آلاف من الشكل (٣) لبكتيريا النيموكوكسى، يبقى الفأر سليما. وليس لدم الأنسان الذي لم يمرض مطلقا بالنيمونيا شكل (٣) نفس الفاعلية الدفاعية. وتظهر القدرة على نقل المناعة كحقن السيرم بمفرده أن الاستجابة المناعية كانت إستجابة عن طريق سائل الجسم (Humoral)، ومكـونـات الحـماية في السـيرم هي جزيئـات بروتين تسمى بالأجسام المضادة. والمناعة عن طريق سوائل الجسم الهامة وعلى الخصوص في الدفاع عن الجسم من البكتيريا التي، مثل النيموكوكسى، تنمو خارج الخلايا.

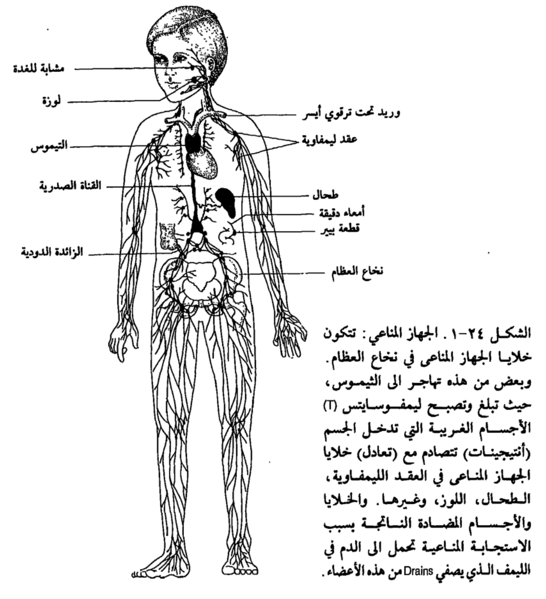
٢٤-٢. تركيب الجهاز المناعي:

THE STRUCTURE OF THE IMMUNE SYSTEM

إن الأنسجـة والأعضـاء التي تكـون الجهاز المناعى مبعثرة في جميع أنحاء الجسم (شكل ٢٤-١). وفي الأنسان (والثدييات الأخرى) فان الأجهزة الرئيسية للجهاز المناعي هي نخـاع العـظام والغـدة التيمـوسية (Thymus). ويحتـوي نخـاع العـظام على الخلايا الـرئيسية (الخـلايا الأم) التي تنتـج جميع خلايا الدم (الشكل ٢٣-١١). وكل من الخمسة أنواع من خلايا الدم البيضاء لها بعض الدور الذي تلعبة في المناعة، ولكن تقـوم بالأدوار المركزية للمناعة الكرات البيضاء الكبيرة (Monocytes) (والتي تنشأ في الأنسجـة بداخل الماكـروفاجز (Macrophages) وكذلك الخلايا الليمفاوية (Lym-phocytes).

ولو أن جميع الخلايا الليمفاوية تتشابة في الشكل تحت الميكروسكوب العادي إلا أنها كذلك بكل معاني الكلمة تتشابة جميعا في الوظيفة. والخلايا الليمفاوية في الواقع هي مجموعة غريبة متنوعة من الخلايا. وعلى أية حال، تقع أغلب تلك الخلايا الليمفاوية المـوجـودة في أجسامنا في مجموعة أو مجموعتين رئيسيتين: خلايا ليمفاوية (ت T)، وخلايا ليمفاوية (ب B).

والخـلايا المقدر لها أن تصبح خلايا ليمفاوية (ت) تبدأ حياتها في نخاع العظام.



الشكـل ٢٤-١. الجهاز المناعي: تتكون خلايـا الجهاز المناعى في نخاع العظام. وبعض من هذه تهاجـر الى الثيمـوس، حيث تبلغ وتصبـح ليمفـوسـايتس (T) الأجســام الغـريبـة التي تدخـل الجسم (أنتيجينـات) تتصادم مع (تعادل) خلايا الجهـاز المنـاعى في العقـد الليمفـاوية، الـطحـال، اللوز، وغـيرهـا. والخـلايا والأجســام المضـادة النـاتجـة بسبب الاستجـابـة المنـاعيـة تحمل الى الدم في الليمف الـذي يصفي Drains من هذه الأعضاء.

ويسرعة، على أية حال، تترك النخاع وتمر في تيار الدم إلى الغدة التيموسية (الشكل ٢٤-١)، وفيها تقـوم بتباينات أكثـر (Differentiation) (أي أختلافات في الشكل)، وعند الإنتهاء من ذلك تماما تكون تلك الخلايا الليمفاوية (ت) مستعدة للقيام بأعمالها.

وتنتـج الخـلايا الليمفاوية (ب) كذلك في نخاع العظام، ولكن بخلاف الخلايا الليمفـاوية (ت) فأنها تصبح ناضجة في النخاع. وعلى أية حال، فأنها تترك كذلك النخاع قبل أن تصبح نشطة في المناعة.

ومن المهام الرئيسية لجهاز المناعة تركيب دفاع ضد المواد الغريبة (Antigens) والتي

تدخل الجسم، إذ لا تصلح الغدة التيموسية أو نخاع العظام لذلك. وعلى هذا فاننا نجد أنه قبل أن تبدأ في عملها، فان كلا الخلايا الليمفاوية (ت) والخلايا الليمفاوية (ب) تبــث من نخــاع العــظــام والغــدة التيموسية إلى مجاميع أوكتل (Clusters) من النسيج الليمفاوى الموزع في جميع أنحاء الجسم. ويتكون هذا النظام من الطحال، العديد من العقد الليمفاوية، اللوزتين، المصران الأعور، أعشاش من الخلايا المبعثرة في أماكن أخرى (الشكل ٢٤-١). والعقدة الليمفاوية هي بقعة مثالية لخلايا الجهاز المناعي لملاقاة المواد الغريبة (الأنتيجنز)، فأي مواد غريبة (مثل البكتيريا) التي تصل إلى الفراغ النسيجي تلتقــطهــا الشعــيرات الليمفـاوية التي تفـرغ في هذا الفـراغ النسيجي وتحملهـا إلى عقدة ليمفاوية. وهنا يسيل الليمف خلال شبكة من الخلايا الأكولة (Phagocytic) (أساسا الماكروفاجز)، ويمكن إبتلاع أية مادة غريبة في هذا الليمف بالخلايا الأكولة المذكورة. ولقد تم معرفة أن أقل من ١٪ من البكتيريا التي تدخل العقدة الليمفاوية يمكنهـا الهروب من تلك العملية. ولكن وظيفة العقدة أبعد بكثير من مجرد الوظيفة البَسيطة وهي تنظيف الليمف. ويتسبب إبتلاع المواد الغريبة (الأنتيجنز) بالماكروفاجز (الخلايا الأكولة) في بدء عملية تبلغ ذروتها في الأستجابة المناعية الوسيطة - خلوية أو المتسببة عن سوائل الجسم أو الأثنين معا.

والإستجــابــات الخــلايا الــوســطية (Cell-mediated) مثــل الأستجــابة في أختبار مانتــوكس، تنــظمهــا الخــلايا الليمفــاوية. فعندما تتقابل الخلايا الليمفاوية (ت) والتي عندها مناعة لأنتيجن (مادة غريبة) خاص مع هذا الأنتيجن ثانية، فأنها تبدأ في تجنيد مجموعة من الخلايا الأخرى (مثل الماكروفاجز) للقيام بعملها. وأقل من ١٪ من الخلايا في موقع تفاعل Mantoux تكون على الخصوص منيعة لبروتينات باسيلس السل، ولكنها عندما تتقابل مع تلك البروتينات، فأن هذا العدد القليل من الخلايا الليمفاوية (ت) يجند عددا أكبر من الخلايــا في المنطقة. والنتيجة هي إستجابة النسيج المميز لإختبار مانتوكس.

وإنتــاج الأجسام المضادة هو مسئولية الخلايا الليمفاوية (ب). وعلى أية حال، فأن إستجابة سائل الجسم للكثير من الأنتيجنز يحتاج كذلك إلى مساعدة الخلايا الليمفاوية (ت) (الشكــل ٢٣-٢). وبــطريقة ما، وهي غير واضحة حتى الآن، فأن الخلايا الليمفاوية (ت) تساعد الخلايا الليمفاوية (ب) الخاصة بالأنتيجن في أن تتبعثر وتتحول

إلى خلايا بلازمية. والخلايا البلازمية هي الخلايا التي تفرز في الواقع الأجسام المضادة.

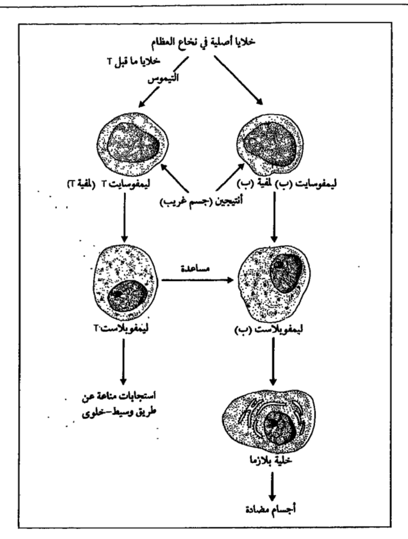
٢٤-٣. تركيب الأجسام المضادة THE STRUCTURE OF ANTIBODIES

من المواد الظاهرة في المكونات المختلفة للدم هي البروتينات مثل الألبيومين، فبرينوجين، الجلوبيولينات (أنظر قسم ٢٣-١٣). ويوجد عدد من الطرق المعملية التي يمكن بها فصل كل مكون من تلك المكونات عن الآخر (أنظر قسم ٢٣-١٣). فاذا ما تم عمل ذلك في السيرم المناعى، فالجزء المحتوي على الجلوبيولينات هو الجزء الذي يمكنه أن يتبع مثلنا هنا، ويحمى الفأر من الموت بالنيموكوكسى (٣) (Pneumococci III ، وهذه الأجسام المضادة (وغيرها جميعا) هي عندئذ جلوبيولينات سيرم.

وشكرا للمجهودات الرائدة للعالم سانجر (Sanger) (أنظر قسم ٤-٤)، إذ أنه يمكن الآن أن نحدد التركيب الأولى للبروتين، أي، مكوناته من الأحماض الأمينية بالضبط. ولقد أمكن عمل ذلك بالنسبة للأنسولين (Insulin) (الشكل ٤-١٧) والهيموجلوبين (أنظر قسم ١٣-٢) والريبونيوكلييز، والبروتين المغلف للفيروس MS_2 (الشكل ١٣-١٤) والكثير غيرها. فلماذا إذن لا نفعل نفس الشيء بالنسبة للجسم المضاد؟

لسوء الحظ، إتضح أنه لا يوجد نوع واحد من جزيء الجلوبيولين الذي يمكن أن يكون جسما مضادا ضد، على سبيل المثال، النيموكوكسى شكل (٣)، إذ يوجد في الواقع الكثير منها. فالأنسولين، والهيموجلوبين، والريبونيوكلييوز، والبروتين المغلف MS_2 كلها تتكون من نوع واحد من الجزيئات والتي يمكن عزلها وتحليلها، ولم يمكن حتى الآن عزل وتحليل الأجسام المضادة. فعزل الأجسام المضادة التي تعمل ضد النيموكوكسى (٣) تمثل واحدا مع مزيج يحتوي على عدد مختلف من جزيئات البروتين، كل بتركيبة الأولى الخاص به. وإلى عهد قريب، لم توجد طرق معملية لتكسير (تفتيت) هذا المزيج حتى يمكن تحليل مكون واحد أو أكثر نقى.

ولقد أمكن إيجاد الحل لهذه المعضلة من التأكد من أن شكلا نادرا من سرطان الأنسان (والفأر) يتضمن جهاز إنتاج الجسم المضاد. وضحية هذا المرض والمسمى الميلوما المتعددة (Multiple Myeloma) ينتج كميات من نوع واحد من جزيء الجسم



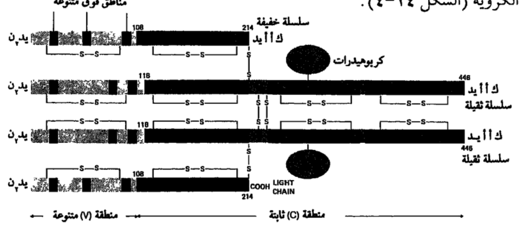
الشكـل ٢٤-٢. ممرات نشـوء الليمفوسايتات النشطة في فرعى الجهاز المناعي وهما ليمفوسايتات (T) للمنـاعـة عن طـريق الـوسـاطـة - بالخليـة، ليمفـوسايتات (B) لانتاج الأجسام المضادة. تحتاج الليمفـوسيتات (B) مساعـدة من تحـت مجموعـة من الليمفوسيتات (T) لكى تستجيب لأنتيجينات معينة. الليمفوسيتات المنقسمة تسمى ليمفوبلاستات.

المضاد. وليس هذا (طبقا لعلمنا حتى الآن) نتيجة الإصابة، ولكن يعتبر مثلا أخر (أنظر قسم ١٩-١) لخلية تدخل في فترة من الانشطار الغير محكوم. وفي هذه الحالة، تعتبـر تلك الخليـة جسما مضادا - مفرزا لخلية، والكلون (Clone) (أنظر القسم ٩-١) الذي ينشأ ينتج منتجا بروتينيا واحدا.

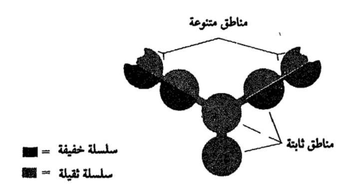
ومـع هذا، لا يعـرف المرء ما هو الجسم المضـاد الذي يعتبر ضد جسم مضاد، فالكميات الكبـيرة والنقاوة لتلك المواد مكنت عددا من البحاث لجمع صورة كاملة

تجعلنا نصدق أن تلك الصورة تمثل التركيب الأساسي للعديد من جزيئات الأجسام المضـادة. وامكن تعـريف خمسـة أشكـال مختلفـة من بروتينات الميلوما (Myeloma) (جزيئات أجسام مضادة) في الأنسان، وأكثرها إنتشارا هو النوع الذي يطلق عليه رمز IgG.

ويوضح الشكل (٢٤-٣) تركيب بروتين الميلوما كما إكتشفه العالم إيدلمان (Edel-man) وزمـلاؤه، ويتكـون الجزيء من (١) سلسلتين طويلتين من عديد الببتيدات (السلاسل الثقيلة) المحتوية على ٤٤٦ حمض أميني و المتطابقة مع بعضها البعض، (٢) سلسلتين قصيرتين (٢١٤ حمض أميني) (و هي السلاسل الخفيفة) التي تطابق كذلك بعضها البعض، (٣) بعض الكربوهيدراتات الملتصقة بالسلاسل الثقيلة. وتلتصق السلاسل الثقيلة ببعضها البعض وبالسلاسل الخفيفة كذلك بكبارى كب - كب (S-S). وتوجـد كذلك كبـارى كب - كب (S-S) داخل السلاسل الخفيفة وكذلك داخـل السـلاسـل الثقيلة وهـذه تدفع الجزيء إلى داخل عدد من المناطق المتلاحمة الكروية (الشكل ٢٤-٤).



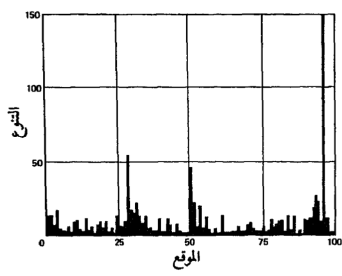
الشكل ٢٤-٣. تركيب سلسلة ببتيد لجزيء جسم مضاد. الأعداد تدل على عدد الأحماض الأمينية (العد ابتداء من نهاية الأمينو الأخير - ن يد٢). السلسلتان الخفيفتان متناظرتان، كما هي السلسلتان الثقيلتان في الجزيء الصحيح، تنثنى السلاسل كى يصبح كل سيستين Cysteine ملاصق للزميل والذي سيكـون معـه ثاني كبريتيـد (S-S) (أنظر شكل ٤-٢٠). وفي نوع معين، الجزيئات المختلفة للجسم المضاد (من الشكل المشاهد هنا) له نفس أو تقريبا نفس تتابع الأحماض الأمينية في المناطق الثابتة، ولكنها تظهر إختلافات واضحة في المناطق المتغيرة. تظهر هذه الأختلافات على الأخص في المناطق الفوق متغيرة. وجزيء الجسم المضاد الخاص الواضح هنا هو من النوع المسمـى IgG. أنواع أخرى، IgE - انظر شكل ٢٤-٢٢) تختلف بعض الشيء في تركيب سلاسلها الثقيلة.



الشكـل ٢٤-٤: شكل توضيحي للتركيب ثلاثي الأبعاد لجزيء الجسم المضاد. وخاصية الجسم المضاد، أي، قدرته على الارتباط مع محدد أنتيجيني معين، يمكن في الممتلكات التي تكونها المناطق المتغيرة في السلاسل الثقيلة والسلاسل الخفيفة. والممتلكات المتكونة بالمناطق الثابتة تقوم بوظائف أخرى في الجزيء.

وأثبت تحليل عدد من بروتينات الميلوما المختلفة في الأنسان وجود بعض التشابهات الغريبة. إذ أن نصف كل من السلسلة الخفيفة وثلاثة أرباع كل من السلسلة الثقيلة أى النهـاية الكـربوكسيلية في كل حالة - الشكل ٢٤-٣) لها في الواقع متواليات متشابهة في كل بـروتين ميلومى في الأنسان لشكل معين مثل IgG. ويطلق على هذه المناطق عندئذ منـاطق (C) الثـابتـة، وتتكون المنطقة الثابتة في السلاسل الثقيلة من ثلاثة متتاليات متشابهة جدا (كل يحتوي على نحو ١٠٨ حمض أميني) مرتبة واحدة خلف الأخرى. وتتشابه هذه المتواليات كذلك مع تلك الموجودة في المنطقة الثابتة للسلسلة الخفيفة.

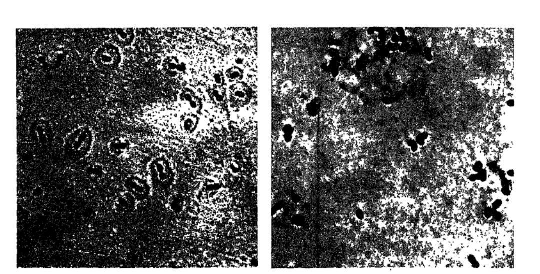
ويختلف الموقف تماما في حلقة النهاية الأمينية (ن يد$_2$) (الشكل ٢٤-٣) لكل سلسلة خفيفة وثقيلة. وهنا، فان كل بروتين ميلومى تم إختبارة في الأنسان يبين عدة أحماض أمينية في كثير من المواقع. وبسبب وجود تنوع في إحلال الحمض الأميني، فأن هذه المنـاطق من السلاسـل يطلق عليها المناطق المتغيرة (V). والتنوع المتتالي في المنطقة (V) يكون على الأخص واضحا في بعض المناطق. وهذه المناطق والمسماة بالمناطق الفوق ـ متغيرة (Hyper Variable) توجد تقريبا عند المواقع ٢٤-٣٤، ٥٠-٥٦، ٨٩-٩٧ في السلاسل الخفيفة (الشكل ٢٤-٥) وعند المواقع ٣١-٣٥، ٥٠-٦٥، ٩٥-١٠٢ في السلاسل الثقيلة. وسنرى في القسم التالي الدليل على أن هذه المناطق الفوق متغيرة هي شرط لعمل الجسم المضاد.



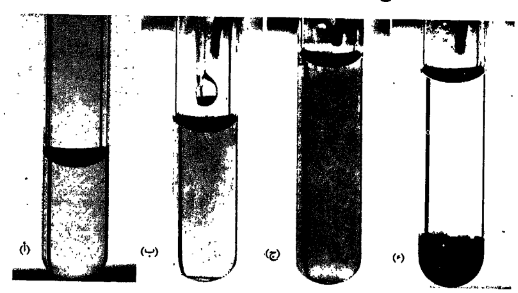
لشكل ٢٤-٥ : درجة التنوع الموجودة عند كل موقع في المنطقة المتنوعة (V) لعـدد كبير من السلاسـل لخفيفـة الناتجـة من بروتينـات الميلوما (Myeloma) وحيث يوجد حمض أميني واحد فقط عند موقع معين، فالتنوع يكون (١). واذا وجد كل من الـ (٢٠) حمض أميني بتردد متساو عند موقع معين، يكون التنوع (٤٠٠). والثلاثة مناطق ذات التنوع المرتفع هي مناطق فوق متنوعة.

٢٤-٤ . التفاعل بين الأجسام المضادة والأجسام الغريبة (الأنتيجينات) :
THE INTERACTION OF ANTIBODIES AND ANTIGENS

الأشكال (٣، ٤، ٨، وغيرها) من النيموكوكسى (البكتيريا) تتحدد بالتركيب الجزيئى لكبسولة عديدة التسكر التي تحيط بالكائن (الشكل ٢٤-٦)، ويمكن إبعاد تلك الكبسـولة عـديدة التسكر من البكتيريا في حالة نقية. وعند إضافة محلول من المضادات الحيوية إلى مضاد - الشكل (٣) النيموكوكسى، يتكون راسب أبيض كثيف (الشكل ٢٤-٧). فإذا ما أختبرت الكميات المستخدمة بعناية، فالمحلول المتبقى فوق الراسب يمكن توضيحة بأنه خال تماما من أي جسم مضاد أو من عديد التسكر. وكل عديد التسكـر وكذلك كل الأجسـام المضـادة والتي كانـت موجـودة نجدهـا مركبـة سويـا في الراسب. إذن، فالأجسام المضادة يمكنها أن تتحد مع المواد التي أظهرتها . نحـن نسـمـى هـذه المـادة بالجسـم الغـريب أو الأنتيجيـن (Antigen). وسلوك الأجسام المضادة يشابه سلوك الأنزيم عندما يتحد مع بديلة (الشكل ٦-١٩). ونفس القـوى الضعيفة التي تربط الأنزيم بمادة تفاعله (مثل الروابط الأيدروجينية) مسئولة كذلك عن ربط الأجسام الغريبة بالأجسام المضادة.



شكـل ٢٤-٦. نيمـوكـوكسـي Pneumococci متحـوصلة (يسـار) وأخـرى غير متحـوصلة (يمين). الأشكال المتحوصلة (S) تعطى مستعمرات ناعمة ومرضية لأنها ليس من السهل أن تلتهمها الخلايا الملتهمة (فاجوسايتس) (الا اذا وجدت أجسام مضادة - الشكل ٢٤-١٠). الأشكال الغير متحـوصلة (R) تنتـج مستعمـرات خشنـة وغير ضارة نسبيا لأنها من السهل أن تلتهمها (تبتلعها) الفاجوسايتس. (بتصريح من روبرت أوستريان، مجلة الطب التجريبي، ٩٨: ٢١، ١٩٥٣).



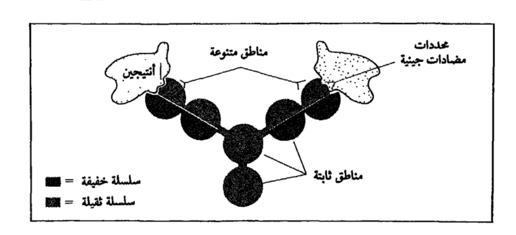
شكل ٢٤-٧: تفاعل الأنتيجين - الجسم المضاد. تحتوي أنبوبة الأختبار الموجودة الى اليسار (أ) على محلول أجسـام مضادة للنوع النيموكوكسى عديد السكريات. يضاف محلول عديد السكريات (ب) وتتكون مركبات للأنتيجين - الجسم المضاد عديمة الذوبان بمجرد ظهور العكارة (ج). وبعد ساعة، ترسب المركبات كراسب (د). فاذا ما كانت النسبة من الأنتيجين للجسم المضاد في المزيج قد أختبرت جيدا، فالسائل الموجود فوق الراسب سيكون الآن خاليا من كليهما.

وعـديـد التسكر (٣) النيموكوكسـى هو بوليمــر (Polymer) ضخم (أي ذو قرابة الوزن الذرى ولكنه يختلف في حجم الجزيء) يتكون من صف طولى من آلاف حدات الحمض الجلوكورنيك (قريب جدا للجلوكوز) والجلوكوز متبادلة مع بعضها بعض (الشكل ٢٤-٨). فاذا ما أضيفت أطوال صغيرة من هذا الجزيء (مثل عديد تسكر، ثلاثى التسكر، غيرها) إلى الأجسام المضادة - الشكل (٣)، يحدث الأتحاد نية. وعلى أية حال، فالقدرة الأتحادية للأجسام المضادة لا تستهلك، فهي مازالت درة على أن تتحد مع الشكل (٣) السليم لعديد التسكر. ومهما يكن، إذا ما جربنا لموالا تحتوي على ٥-٧ وحدات من السكر، فلا يصبح الجسم المضاد قادرا على الأتحاد ع عديد الطبيعي. وهذا يجعلنا نقترح بأن جزيئات الجسم المضاد تتحد مع الجزء من ـديد الذي يتكون فقط من ٥-٧ وحدات سكر طويلة (أو على وجه التقريب ٢٤-٣٠ ،. و مما يدعو إلى الدهشة أن نلاحظ أن الأجسام المضادة الموجهة ضد أشكال أخرى ن الجزيئات (مثل البروتينات) تتحد كذلك مع جزء واحد فقط من الجزيء، وأن هذا لجزء يكون من نفس الطول. وبذلك لا يكون كافيا أن نقول بأن الأجسام المضادة تحـد مع الأنتيجينات (الأجسام الغريبـة)، ولكنها بالأحـرى تتحـد مع جزء صغير ن الأنتيجيـن والمسمـى بالحاسم الأنتيجيني (Antigenict Determinant).

ونحن نفترض أن المحدد الأنتيجيني يناسب الدخول (Fits) في تجويف أو شق موجود ملى جزيء الجسم المضـاد، ولهـذا الشق شكل مكمل للمحدد (الشكل ٢٤-٩)، لذلك فاننا نتعامل مع نفس نظام نوع القفل والمفتاح والذي إفترضناه لتعقيدات للمواد لمعقدة المكونة من الإنزيمات ومواد تفاعلها (الشكل ٦-١٦). ويجب ملاحظة أن أماكن

COO⁻ CH₂OH COO⁻ CH₂OH
O O O O
O OH O OH
HO OH OH HO OH OH

شكل ٢٤-٨: التركيب الجزيئى للكبسولة عديدة السكريات المحيطة بالنوع من النيموكوكسى. لجزيء بوليمـر طويـل جدا غير متفـرع ويتكـون من وحـدات متبادلة من الجلوكوز وحامض ـلوكورونيك (مع المجموعة - ك أأ-).

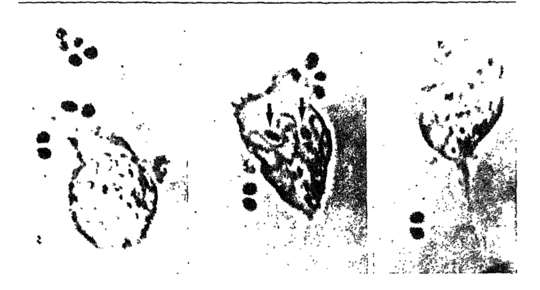


الشكل ٢٤-٩: رسم توضيحي لارتباط جزيئين من الأنتيجينات بمواقع ربط - الانتيجينات في المتلكات المتنوعة للجسم المضاد. ومناطق (v) في السلاسل الثقيلة والسلاسل الخفيفة تشترك في تكوين موقع ربط - الأنتيجين. والموقعان في جزيء متشابهان.

المناطق الفوق متبانية للسلاسل الخفيفة والثقيلة مرتبة بحيث يمكن لخمسة من الستة أن تساهم في عمل الشق، والذي هو مكان أتحاد - الجسم المضاد.

وأغلب الأنتيجينـات أكثر تعقيدا في التركيب عن الشكل (٣) العديد التسكر. والسم الذي تفرزه بكتيريا الدفتيريا وكذلك الغلاف الخارجي لفيروس شلل الأطفال (Polio) لهما مثـالان لبروتـين الأنـتيجن واللذان لهما عدة محددات (Determinants) أنتيجينية. ويظهـر التعـرض لتلك المواد تكوين أجسام مضادة ضد الحاسم. وبينما ينطبق ذلك على جزء واحد فقط من قصة تعدد الجسم المضاد، فليس من المستغرب أن البحاث الأول قد خاب أملهم في بحثهم عن جزيء جسم مضاد واحد لتحليلة.

وما هي الأهمية الحيوية في إيجاد الجسم الغريب (الأنتيجن) والجسم المضاد؟ بمجرد حدوث الأتحـاد، يكون للجسم المضـاد عدة آليات يمكنه بها أن يتعامل مع مركب الأنتيجـين - الجسم المضـاد، ويمكن مشـاهـدة إحـدى هذه الآليات في الشكـل (٢٤-١٠). فالحافظة (الكبسولة) التي تحيط بالنيموكوكسى تتدخل كثيرا في حدوث ألتهامها بالخلايا الأكولة (Phagocytes). وفي الحقيقة فان تلك الخاصية للكبسولة هي التي تجعـل من بكتيريا النيموكوكسي عديمة الكبسولة (من أشكال ر - R Forms) لا تسبب المرض، فأذا ما وجدت الأجسام المضادة المناسبة لمضاد النيموكوكسى، فأنها تتحـد مع الكبسولة وتجعل الخلايا سهلة الألتهام عن طريق خاصية الابتلاع داخل



شكل ٢٤-١٠: فاجوسايتوزس (الالتهام). يسار = خلية نيتروفيل تمد قدما كاذبا نحو اثنين من بكتريا نيموكوكسى. في الوسط: تم أحتواء هذه البكتريا (الأسهم) وبدأت النيتروفيل في إحتواء رابعة أخرى من البكتريا المذكورة عند أعلى اليمين، وترك زوج من البكتريا (الى اليمين). أضيفت أجسام مضادة للكبسولة عديدة السكريات المحيطة بالنيموكوكسى لاسراع عملية الالتهام. (من و. ب. وود، م. ر، سميث، ب. والسن، مجلة الطب التجريبي، ٨٤: ٣٨٧، ١٩٤٦).

لبلازما (Endocytosis). وفي الأيام التي سبقت إكتشاف الأجسام المضادة، فان بداية انتاج الجسم المضاد بواسطة الجهاز المناعى للمريض كانت الدليل على نقطة التحول في تقدم المرض.

وتوجد طريقة أخرى لتقدير أهمية الأجسام المضادة وهي إختبار مصير هؤلاء الأطفال (عادة أولاد) والذين يرثون عاملا نادرا هو المثبط (المرتبط بكروموسوم الجنس X-linked) في قدرتهم على صنع الخلايا الليمفاوية (ب). وفي الشهور الستة الأولى في حياة هؤلاء الأطفـال، تستمـر حياتهم طبيعية، وشكرا للأجسام المضادة لأمهاتهم والتي وصلت لهؤلاء الأطفال عن طريق المشيمة. ولكن بعد ذلك، لاتصبح هذه الحماية فعالة إذ يبدأ الأطفـال في التعرض لأصابات خطيرة متتالية. وشكرا للأجسام المضادة وللحقن الدورى لجلوبيولين المناعة (IG) في الأنسان، والتي تمكن هؤلاء الأطفال من البقاء على قيد الحياة وأن يعيشوا معيشة طبيعية نسبيا. فالجلوبيولين المناعى هو كسر الجلوبيولين جاما في البـلازمـا والمتجمـع من ألاف المتـطوعـين، ويحتوي على أجسام مضادة ضد معظم الأمراض الوبائية التي تصيب الأنسان. وتزود حقن الـ (IG) حماية مؤقتة موجبة تماما كما

تحمى حقنة من سيرم مضاد - النيموكوكسى الفأر كما تم شرحة في القسم السابق. وتـوصف هذه الحـماية بأنها موجبـة لأن الأجسـام المضادة لم تنتج من الجهاز المناعى للشخص نفسه.

٢٤-٥. المواد الغريبة (الأنتيجينات) ANTIGENS

ولو أننا حتى الأن أكدنا دورا لمناعة ضد الكائنات المرضية، فان دور الجهاز المناعى بدون شك ينصب على التعامل مع مثل تلك المواد. فالجهاز المناعى قادر على صنع الأجسام المضادة ضد مجموعة من المواد الغير مرضية مثل حبوب لقاح نبات الرجِّيد (Ragweed) ، لدغ الحشرات، الجسم الغريب (الأنتيجين) Rh ، وهي ثلاثة أمثلة تضايق الأنسان. والأنتيجين Rh موجود على سطح خلايا الدم الحمراء في الأفراد ذوى Rh الموجبة. وقبل إكتشاف هـذا الأنتيجين Rh ، فـالنسـوة من النـوع Rh السالب (حيث تكون خلايا الدم الحمراء فيهن فاقدة للأنتيجين) كان ينقل لهن بدون إنتباه دما من النوع Rh الموجب، ولم يكن معروفا عندئذ أن إستجابتهن كانت نتيجة تكوينهن أجساما مضادة ضد Rh . فاذا ماحملت مثل هذه المرأة فيها بعد بطفل Rh موجب (هذه الصفة مورثة كسائد)، فان الجنين يصاب بأنيميا حادة إذ تهاجم الأجسام المضادة للأم (عبر المشيمة) خلاياه الحمراء ويشحن الجهاز المناعى كذلك الخلايا الليمفاوية (ت) ضد العوامل الغير مرضية، والعنصر الفعال في نبات الأيفى (Ivy) السام لهو مثل مشهور.

فهل توجد، عندئذ، حدود لما يمكن أن يعمل كأنتيجين؟ ولقد رأينا أن عديدات التسكر والبروتينات تعمل كأنتيجينات رائعة، الأحماض النووية تعتبر أنتجينات ولو أنها أقل فاعلية، وهي المجموعة الثالثة الرئيسية ذات الجزيئات الكبيرة. ومن جهة أخرى، فجزيئات صغيرة (مثل الجلوكوز) لا تظهر تكوين الأجسام المضادة. فالحجم، على ذلك، يبدو وكأنه أحد الأحتياجات المطلوبة لإثارة الاستجابة المناعية. ولكن ماذا عن الجزيء الصغير الذي يسبب التسمم الموجود في نبات الأيفى السام (Poison Ivy) ؟ والذي من الممكن حدوثة في هذه الحالة هو أن هذا الجزيء الصغيرة يتحد أولا مع بعض البروتينات في الجلد، والناتج المعقد هو الذي سيصبح أنتيجين.

ولو أن الجزيئات الكبيرة فقط هي التي تنبه الميكانيكية المناعية، فان الأجسام المضادة

التي تتكون تتحد مع بروتين صغير، المحدد، للأنتيجين، والتفاعل بين الأثنين يكون محدداً بدرجة مذهلة. ويمكن لجهازنا المناعي أن يصنع الأجسام المضادة التي يمكنها أن تميز بين إنسولين الخنزير وإنسولين الإنسان (حيث يوجد حمض أميني واحد فقط من ٥١ حمض مختلف) وحتى بين الجالاكتوز الموجود في محدد (Determinant) (مشابهات Isomers) متماثلة تماما في كل شيء فيما عدا في توجيه مجموعة (يد-)، (- أ يد) (أنظر الشكل ٤-٩).

توجد مجموعة واحدة من الجزيئات الكبيرة لا تعمل كأنتيجينات، وهي جزيئات كبيرة من مكونات الجسم العادية. فنحن نصنع أجساما مضادة إستجابة لحقن البيومين من البقر ولكن لا نصنع تلك الأجسام المضادة إستجابة لألبيومين الإنسان. و السبب هو أن جزيئات الألبيومين في أي إنسان لها نفس تركيب جزيئات الألبومين في أي إنسان آخر. لذلك لابد لنا من إضافة شرط جديد حتى يمكن للجزىء الكبير أن يعمل كأنتيجين وهو فقط أن يكون غريبا عن الجسم.

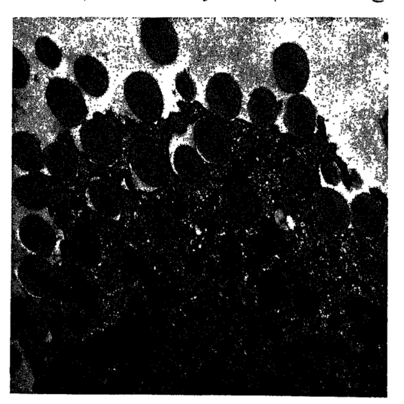
ولو أن البشر (Humans) يشتركون في جزيئات كبيرة كثيرة، لكن كل منا يمتلك جزيئات كبيرة أخرى خاصة (Unique) به فقط (إلا في حالة وجود توأم متماثل). وهذا هو سبب مهاجمة طعوم (grafts) من الجلد (أو أي عضو) من فرد إلى أخر بالجهاز المناعى للفرد المستلم بينما في حالة طعم من جزء من الجسم إلى جزء أخر في نفس الفرد فانه لا يهاجم. ولهذا فان الجهاز المناعى يميز بين الشخص "Self" وغير الشخص "Nonself".

٢٤-٦. كيف تظهر الأجسام المضادة؟ HOW ARE ANTIBODIES ELICITED ?

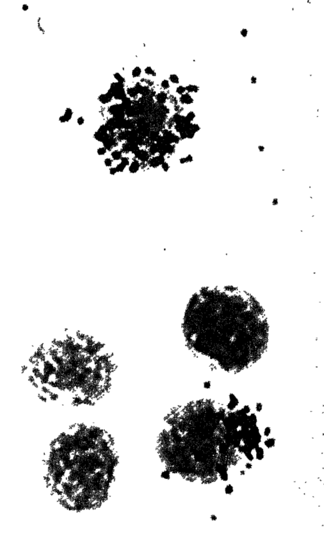
تم إجراء كمية هائلة من الأبحاث لكي توضح جميعها الخطوات التي تحدث إبتداء من دخول الجسم الغريب (الأنتيجين) في الجسم وحتى إبتداء تخليق الجسم المضاد. ويمكن الآن إجراء كل العملية معمليا (في أنبوبة أختبار). ويوجد نوعان من الخلايا نحتاج إليهما غالبا، هما الخلايا الأكولة (Phagocytes) وهي النسيج المماثل للمونوسايتات أي كرات الدم البيضاء الكبيرة (Monocytes) (الشكل ٢٣-١١)، والكريات الليميفافوية أو الليمفوسايتات (Lymphocytes). والخطوة الأولى في العملية هي إبتلاع الجسم الغريب (الأنتيجين) بخلايا الدم الأكولة

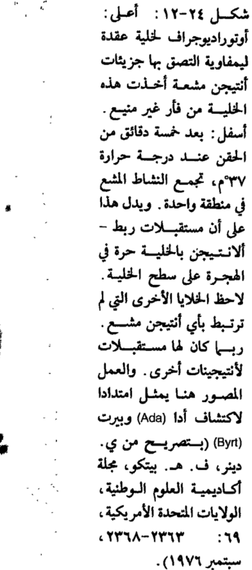
(الفاجوساتيات) (الشكل ٢٤-١١)، وما يحدث بعد ذلك لايزال غير مؤكد، ولكن بطريقة ما فان كريات الدم الأكولة تتفاعل مع كريات الدم الليمفاوية.

ويمكنك أن تدعى، كما فعل الكثيرون في وقت من الأوقات، بأن الخلايا الأكولة تأمر الخلايا الليمفاوية ماذا يمكنها أن تفعل في الخطوة التالية لتخليق الجسم المضاد. ولكن بكل تأكيد ليست هذه هي الحقيقة. إذ يوجد دليل كاف على أنه قبل إدخال الجسم الغريب (الأنتيجين)، فان الجسم يكون به بالفعل خلايا ليمفاوية قادرة على التعرف على هذا الجسم الغريب (الأنتيجين). والخلايا الليمفاوية توضح هذه القدرة بالأتحاد الحقيقي بالأنتيجين، وربما بعد أن يكون هذا الأخير قد تمت معالجته بطريقة ما بالخلايا الأكولة. ويحدث التفاعل بين الخلايا الليمفاوية و الأنتيجين عند مستقبلات موجودة على سطح الخلايا والتي تكون من المحتمل متماثلة (على الأقل في موقع الألتحام أو الأتحاد) مع جزيئات الجسم المضاد والتي تظهر أخيرا في الدم.



الشكـل ٢٤-١١: خلية ملتهمة (فاجوسايت) في خنزير غينيا تبتلع حبوب بوليستيرين. توجد حبـوب عديـدة محاطـة بالفعـل في فراغـات، بينما حبوب أخرى في طريقها الى الابتلاع (مكبرة ٢٠,٠٠٠ بتصريح من دكتور روبرت ج. نورث).



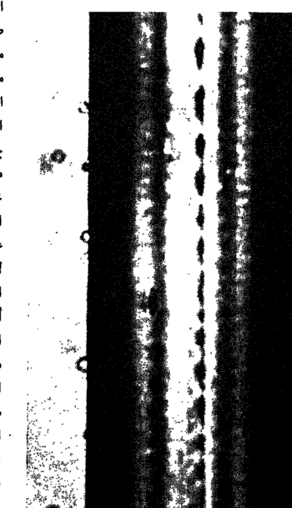


شكـــل ٢٤-١٢ : أعـلى : أوتوراديوجراف لخلية عقدة ليمفاوية التصق بها جزيئات أنتيجن مشعـة أخـذت هذه الخليــة من فأر غير منيـع . أسفل : بعد خمسة دقائق من الحقن عنــد درجــة حرارة ٣٧°م، تجمـع النشاط المشع في منطقة واحدة . ويدل هذا على أن مستقبــلات ربط - ألانــتيجن بالخليــة حرة في الهجـرة على سطح الخليـة . لاحظ الخلايا الأخرى التي لم ترتـبط بأي أنتيجن مشـــع . ربـــما كان لها مســتقبــلات لأنتيجينات أخرى . والعمل المصـور هنـا يمثـل امتدادا لاكتشاف أدا (Ada) وبيرت (Byrt) (بـــتصريـــح من ي. دينر، ف. هـ. بيتكو، مجلة أكـاديميـة العلوم الـوطنية، الولايات المتحدة الأمريكية، ٦٩ : ٢٣٦٣-٢٣٦٨، سبتمبر ١٩٧٦).

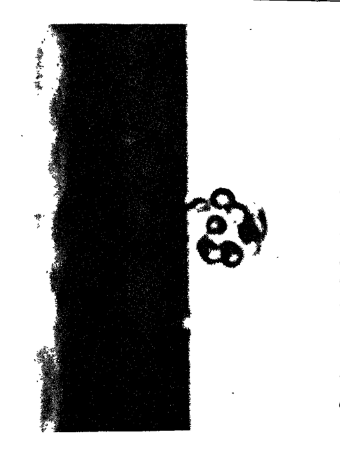
ولنتفحص الآن تجربتين من تلك التجارب اللتان تؤديان إلى هذه الخاتمة الرائعة . فمنذ عدة سنين مضت، قام عالما المناعــة الأستراليان أدا (Ada) ، بيرت (Byrt) بتجهيز أنتيجين شديد الأشعاع . وعند مزج هذا الأنتيجين مع خلايا ليمفاوية مأخوذة من فأر لم يسبق تعرضة من قبل لأي أنتيجين، ؛فان هذا المزيج قد ألتصق بنسبة مئوية صغيرة (٠٫٠٢٪) من الخلايا (الشكل ٢٤-١٢)، إذ كان الأشعاع المتبقي من التعداد الأصلى إلى فأر قد سبق تدمير جهازه المناعى (بأشعة أكس)، كان هذا الفأر غير قادر على تخليــق أجســام مضادة للأنتيجين الأصلى . وعلى أية حال، كان الفأر قادرا تماما على تخليق أجسام مضاد ضد أي أنتيجين آخر، وحتى ضد تلك الأنتيجينات القريبة التشابه .

لذلك يبدو أن الفأر الغير منيع كان يمتلك بالفعل بعض الخلايا الليمفاوية التي تحمل مستقبـلات مشـابهـة للجسم المضـاد (Antibody like) والتي على إستعداد لأكتشاف والتعامل مع المحدد الأنتيجينى المستجيب عندما وكلما ظهر.

وفي عام ١٩٧٢م، بين العالم إيدلمان (Edelman) ومساعدوه في جامعة روكفلر وجود خلايا متفاعلة - أنتيجينيا (Antigen-reactive) في الفأر عديم المناعة وذلك بطريقة معملية أخرى. فلقد الصقوا أنتيجين بسطح ألياف نيلون ثم وضعوا تلك الألياف في طبق يحتوي على خلايا طحال (معظمها خلايا ليمفاوية) مأخوذة من فأر غير منيع، فالتصقت نسبة مئوية ضئيلة (نحو ١٪) بتلـك الأليـاف، دلالة على وجود جزيئات تكميلية من مشابه الجسم المضاد على سطحها (الشكل ٢٤-١٣).وفي الحقيقة، بمجرد



الشكـل ٢٤-١٣: خلايـا طحـال فأر (ليمفـوسايتس) ملتصقـة بسطح ليفة نيلون مغلفـة بأنتيجن. لا تلتصق الخلايا (١) اذا كانت ليفـة الـنيلون لها أنتيجن ملتصق بها؛ (٢) اذا عرضت الخلايا مسبقـا لنفس الأنتيجن في محلول (وبـذلـك تمتلىء كل المسـتـقبـلات)؛ (٣) اذا عرضت الخـلايـا من قبـل لأجسـام مضادة ضد أجسام الفأر المضادة (وبذلك نقترح أن المسـتـقبـلات هي، في الحقيقـة، جزيئـات جسم مضاد (بتصريح من ج. م. ايدلمان من يو. رايتشاورز، س. ف. ميليـت، ج.م. ايدلمان، مجلة أكاديمية العلوم الـوطنيـة، الولايات المتحدة الأمريكية، ٦٩:١٩٥، ١٩٧٦).

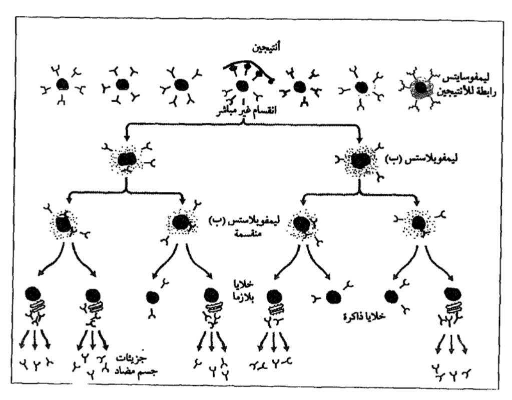


الشكــل ٢٤-١٤ : في هذه الصــورة خلية طحـال فأر ملتصقـة بليفة نيلون مغلفة بأنتيجن والتي كانت معرضة لخلايـا دم حمراء من خروف مغـلفــة بنـفس الأنتيجن. والنتــائــج (كـما في شكـل ٢٤-١٢) تقــترح أن مستقبـلات الخليـة المرتبطة بالأنتيجن موزعــة على كل السطح. خلايا دم الخروف الحـمــراء الـغـير معــاملة لاتلتصق بخلية الفأر هذه. (بـتـصريـح من ج. م. ايـدلمـان، من نفس المقـالـة كالموجودة في الشكل (٢٤-١٣).

الألتصاق، فان باقي سطح الخلية كان لايزال قادرا علـى التفاعل مع أجســام غريبـة (أنتيجينـات) إضافيـة (الشكل ٢٤ - ١٤) . وعلـى أيـة حـال ، إذا مــا كانت الخلايا قد عوملـت من قبل بجسـم غريب (أنتيجين) أو بأجســام مضادة موجهـة ضد الأجســام المضــادة للفأر (مضادات ـ الأجسام المضادة Anti-antibodies) فان أي التصاق لم يكن قد حدث.

وبمجرد أن يلصق الأنتيجيز نفســه بمستقبـل الخلية الليمفاوية المناسبة تتنبه هذه الخلية وتنقسم (الشكل ٣٤-١٥) إنقساما غير مباشر، مكونة مجموعة متماثلة (Clone) من الخلايا القادرة على تخليق هذا الجسم المضاد بالذات الذي يتكون. والفكرة بأن مجاميع الخلايا المتماثلة (Clones) المنتجة للأجسام المضادة قد تكونت ليس عن طريق الأوامر ولكن كنتيجة للتنبيه الأنتخابي لخلايا موجودة مسبقا (Preexisting) يطلـق عليها أســم نظريـة إنتخاب المجموعـة المتماثلـة (Clonal Selection).

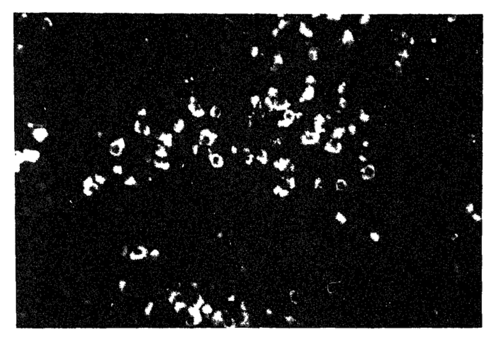
ومتطلبات التمثيل الغذائي للأنقسام الغير مباشر كبيرة جدا بحيث لا يمكن تخليق



الشكل ٢٤-١٥ : رسم تخطيطي لنظرية أختيار الكلون. الاختيار الكلوني يؤدي الى أنتاج خلايا بلازما مفرزة للجسم المضاد ومجموعة (Pool) مكبرة من خلايا معينة حساسة للأنتيجين (ذاكرة). والشكل المحدد الذي يقدم فيه الأنتيجن للخلايا الحساسة للأنتيجن غير معروف.

الكثير من الأجسام المضادة أثناء فترة الأنقسام. ولكن يأتى الوقت الذي تتوقف عنده الكثـير من خلايا المجموعة المتماثلة (Clone) عن الأنقسام وتبدأ في إنتاج الكثير من الأجســام المضادة. وتنشأ شبكة إندوبلازمية خشنة كبيرة (أنظر قسم ٥-٨) وبسرعة تعمل الخلية على خلق مركب بروتيني رئيسي هو: الجسم المضاد. ومثل تلك الخلية تسمى خليـة البلازما (Plasma Cell). وبعد التجمع في جهاز جولجى (حيث يضاف بعض من الكربوهيدرات) يفرز الجسم المضاد من الخلية بواسطة خاصية طرد المواد خارج السيتوبلازم (Exocytosis).

ويوضح الشكل (٢٤-١٦) خلايا بلازمية مأخوذة من طحال أرنب إكتسب المناعة بالشكل النيموكوكسى الثالث (٣). ولقد عوملت الخلايا البلازمية أولا بالشكل (٣) عديد السكـريات، ثم بمضــاد- الشكل (٣) من الأجسام المضادة والتي تم مزجها بصبغة مضيئة (فلوريسينى). وبرؤيتها تحت الضوء الفوق بنفسجي، تظهر كل خلية



الشكل ٢٤-١٦ : خلايا بلازما محتوية على جسم مضاد من طحال أرنب تمت مناعتة بالشكل III من النيموكوكسي. عوملت هذه الخلايا أولا بالأنتيجين للشكل III عديد السكريات النيموكوكسي، ثم بمضاد الشكل III من الأجسام المضادة الملتصقة بصبغة مضيئة. وبرؤيتها تحت الضوء الفوق بنفسجي، تلمح بشدة تلك الخلايا البلازمية الصانعة للأجسام المضادة ضد الشكل III. (بتصريح من دكتور البرت هـ. كونز).

تقوم بصنع مضاد - الشكل (٣) براقة وذات لمعان شديد.

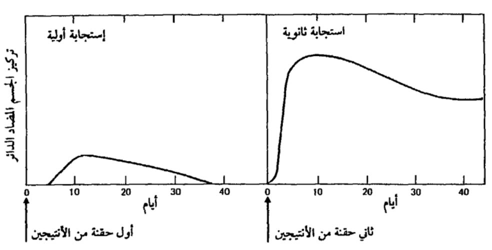
وما هو الأحتمال في أن تلك الخلايا القليلة من الخلايا الليمفاوية القادرة على التعرف على محدد أنتيجيني معين ستتصادم في الواقع مع الأنتيجين الحامل لهذا المحدد ؟ ربما نتوقع أن يكون هذا الأحتمال طفيفا جدا ولكنه في الواقع عال بعض الشيء، لأن الخلايا لليمفاوية (ب) والخلايا الليمفاوية (ت) تهاجر داخل وخارج العقد الليمفاوية، الليمف النازح من عقدة لا يحتوي فقط على أية أجسام مضادة تم تخليقها داخل لعقدة ولكنه يحتوي أيضا على عدد قليل من الخلايا الليمفاوية (ب) وعدد كبير من لخلايا الليمفاوية (ت). وترجع هذه الخلايا إلى الدم في الأوردة التحت ترقوية، ومن مناك تتوزع في جميع أنحاء الجسم. والعقد الليمفاوية - مثل أي نسيج أخر - يتم غذيتها بالدم الشرياني. وعندما تجد الخلايا الليمفاوية نفسها في وريد صغير يصرف م شعيرات العقدة الليمفاوية، فانها تهاجر خلال جدر تلك الأوردة الصغيرة وتأخذ لها

سكنا مؤقتا في العقدة. وحركة المواصلات الصعبة هذه للخلايا (ب)، (ت) داخل وخارج العقد الليمفاوية تزيد من إحتمالات أنه عندما يدخل جسم غريب (أنتيجين) الجسم، فالخلايا المناسبة (ب)، (ت) ستقوم بالتصادم معه.

٢٤-٧. الأستجابة الثانوية : THE SECONDARY RESPONSE

بعد الشفاء من الأصابة، يقل تركيز الأجسام المضادة ضد الكائن المرضى بالتدريج على مدى عدة أسابيع، أو أشهر، أو حتى سنين، وقد يأتى الوقت الذي لا يكتشف فيه أي جسم مضاد. فهل هذا يعني أن الشخص في خطر ثانية من الأصابة بالمرض ؟ في كثير من الحالات، لا. فبينما نجد أن إنتاج مستوى محسوس من الأجسام المضادة عند أول تعرض للأنتيجين يحتاج في المتوسط إلى أربعة أو خمسة أيام، فان إعادة التعرض - وحتى بعد عدة سنين - تحتاج إلى إستجابة أسرع وأكبر للجسم المضاد (الأنتيجين)، وتسمى هذه بالاستجابة الثانوية (Secondary Response) (الشكل ٢٤-١٧).

فما هي الآلية التي تعمل هنا ؟ يبدو أن المفتاح هو وجود، أثناء فترة التدخل، تعداد أكبر من الخلايا الليمفاوية الحساسة للأنتيجين- Antigen Sensitive (خلايا للذاكرة Memory cells) عما كان موجودا قبل الأستجابة الأولية. وأثناء النشوء الأول



الشكل ٢٤-١٧: إنتاج الأجسام المضادة أثناء حدوث استجابة نموذجية أولية (يسار) وثانوية (يمين). والوقت اللازم لحدوث الاستجابة يختلف تبعا لعوامل مثل طبيعة الأنتيجين والطريقة التي يتعامل بها الأنتيجن مع الحيوان.

للمجاميع المتماثلة (Clones) ، فان بعض الخلايا الجنينية لاتنقسم أو تتحول إلى خلايا ليمفـاوية صغيرة تحتل نفس جزيئات الجسم المضاد على أسطحها مثل الذي كانت تحملة سلفهـا (الشكل ٢٤-١٥) وبهذه الطريقة، فان العدد الكلى لمثل هذه الخلايا الحساسة - للأنتيجين يزداد بالضرورة وبذلك يضع الأساس لأستجابة أكبر. (وبالتالي يتم أكتشـافهـا بسرعة) في المرة التالية التي يظهر فيها الأنتيجين. ويؤيد هذه الفكرة الأكتشاف الذي أظهر أنه عند مزج خلايا طحال فأر ذو مناعة بألياف النيلون المغلفة بالأنتيجين المناسب يزداد عدد الخلايا التي تلتصق (وهذه ليست خلايا مفرزة - للجسم المضاد).

ولا تحتاج الأستجابـة الثانويـة إلى حوض (Pool) من خلايا الذاكرة فقط، ولكن لابد من أن يكون لهذه الخلايا عمر طويل إذا افترضنا أنها لن تنقسم مطلقا ثانية إلا إذا صادفها الأنتيجين المناسب. و يبين عدد من الدراسات أن بعض الخلايا الليمفاوية التي تدور من العقـد الليمفاوية إلى الدم والعودة ثانية هي، في الحقيقة، ذات عمر طويل. ويوجد دليل في الأنسان أن بعض الخلايا الليمفاوية الصغيرة تعيش لمدة قد تصل إلى ٢٠ سنـة.

وتمدنا الذاكـرة المناعية بالأساس الرئيسي لأستخدام اللقاحـات (Vaccines) ، وهي مستحضرات من كائنات سامة أو ممرضة والتي تم تغييرها بحيث لا تسبب أية أمراض. والتغيير ليس، على أية حال، عنيفا بحيث أن الأجسام المضادة الناتجة إستجابة للمادة المتغيرة لن تحمى ضد الكائن الغير متغير والمسبب للمرض. ويعنى هذا في العادة أن التغير لابد و أن يترك بعضا من المحدذات الأنتيجينية سليمة. ويستخدم الفورمالين غالباً لجعل البكتيريا والفيروسات غير ممرضة بدون إتلاف كل المحددات الأنتيجينية، ويحضر لقاح سالك لشلل الأطفال بهذه الطريقة.

وأول مصل علمي تم تصنيعة بواسطة الطبيب الأنجليزي إدوارد جينر (Edward Jenner) عام ١٧٩٦ م، وصنع تاريخا طبيا بحقن إنسان بمادة عصرت من بثرة في فتاة أصيبت بجـديري البقـر ثم، بعد عدة أشهر، بمادة من بثرة إنسان مصاب بالمرض المخيف الجديرى، وبقى هذا الأنسان سليما جدا. وأجرى جينر هذه التجربة الجريئة لأنـه (وغـيرة) لاحظ لمدة طويلة أن الفتيات الـلاتي تعرضن للجدري بسبب طبيعة عملهن كانت عندهن حماية من الإصابة بالجديري. واليوم نحن نعرف أن أنتيجينات

فيروس جديرى البقـر مشـابهة تماما لأنتيجينات فيروس الجديرى وتعتبر المناعة ضد أحدهما حماية ضد الآخر.

وربـما تكـون قد حصنت باللقـاحات لمرضى الجديري وشلل الأطفال، وكذلك باللقاح الثلاثي للتيتانوس والدفتيريا والسعال الديكي. وكان لابد لك أيضا من أن تكون قد حصنت ضد الحصبة والغدد النكفية والحصبة الألمانية (الروبيلا).

وكان التحصيـن ضد الجديـرى ناجحا لدرجـة أنه لم تكتشـف حالات طبيعيـة لهذا المـرض على وجـه الأرض منـه ما حدث لانسان يسمى على ماو ماولين (Ali Maow Maalin) وهو طباخ في الصومال الذي أصيب بهذا المرض في أكتوبر ١٩٧٧م وشفي منه تماما. وأعلنت هيئة الصحة العالميـة (WHO) رسميا أن العالم أصبح أخيرا خاليا من الجديري تماما. واستئصال ماكان يعتبر في يوم من الأيام أحد مصائب الأنسانية (وهو الجديرى) لهو مثال للنصر الذي يدل على كيفية إستخدام المعرفة الحيوية (البيولوجية) والتي يمكنها تحسين وسائل الحياة الأنسانية.

٢٤-٨. الأساس الوراثي لتنوع الأجسام المضادة:

THE GENETIC BASIS OF ANTIBODY DIVERSITY

ولو أنه لا يعرف أحد تماما كم نوعا مختلفا من جزيئات الجسم المضاد يمكن للانسان أن يخلقة، فأنه يوجد دليل يقترح على أنها ما بين (10^5)، (10^7)، ويمكننا أن نوازن ونسـتخـدم العـــدد المليـون (10^6) كرقـم، وهـذا يخلق مشكلـة محيرة فوريـة في الوراثـة. فالأجسـام المضادة بروتينـات وجميع الدلائـل تدل علـى أنها تخلق بنفس ميكانيكيـة DNA ← mRNA ← عديد الببتيدات والمستخدم لجميع البروتينات الأخرى. أي يمكن القول، بأن المعلومات عن جزيئات الجسم المضاد مخلقة في (DNA) كما هو الحـال في الهيمـوجلوبين، والليزوزيم، وغيرها. وفي الباب الثالث عشر، قدرنا أن الأنسان عنده دليل (DNA) يمكنه أن يحوي دليل ٣٠-٤٠ ألف بروتين مختلـف. ويجب توضيح تلك المعضلـة: كيف يمكـن للنظام الجيني (Genome) لعدد ٣٠-٤٠ ألف جين عمل دليل مصطلحات لمليون نوع مختلف من جزيئات الجسم المضاد (لاداعى لذكر جميع البروتينات الأخرى والتي تصنعها).

ويظهر الحل الممكن الوحيد للمشكلة عندما نتأمل ثانية تعقيدات تركيب جزيئات الجسم المضاد في السلسلة الخفيفة - السلسلة الثقيلة. فاذا ما برمج (Encode) جين واحد عديد ببتيدات واحد (أنظر قسم ١٣-٢)، فاننا عندئذ نحتاج إلى جين واحد

منفصـل لكـل سلسلة. ولكن بدلا من زيادة عدد الجينات المطلوبة، فان ذلك قد يقللها. فاذا ما أمكن لألف (١٠٠٠) سلسلة مختلفة خفيفة، ١٠٠٠ سلسلة مختلفة ثقيلة أن تتحد بطريقة عشوائية لأنتاج جزيء جسم مضاد فعال، فاننا عندئذ نفترض أننا نحتاج إلى ٢٠٠٠ جين فقط لعمل دليل أصطلاحى (برمجة) (Code) لمليون جزيء جسم مضاد (١٠^٣ × ١٠^٣ = ١٠^٦). ومنذ عشر سنوات مضت، شعر الكثير من علماء المناعة أن ٢٠٠٠ جين تعتبر قطعة صغيرة لتقوم بهذا الجهاز الهام وأنه ربماتوجد ألاف من الجينات جاهزة (ميسرة) لتخليق الجسم المضاد.

ويمكن حتى للحمل الوراثي أن يصبح أصغر إذا ما أمكنك إيجاد الأفتراض الأبعد وهو أن الـ ٢٠٠٠ جين التي تحتاج إليها لعمل الدليل الأصطلاحي خصائص ١٠^٦ جسم مضاد تستطيع فقط أن تعمل هذا الدليل الأصطلاحي لعدد (V) مناطق، (V) منطقة تمثل نصف السلاسل الخفيفة وربع فقط السلاسل الثقيلة. فاذا ما أفترضت جينات منفصلة (Seperate genes) للمناطق (V) والمناطق (C) فيمكنك إذن أن تستمر مع حفنة من جينات المنطقة - C (مثل هذا الأحتمال - والذي أتضح أنه هو الوضع - يجبرنـا علـى أن نحـور ونعـدل نظريتـنا مـن جـين واحـد لكـل عديـد الببتيـد إلـى جيـن لكـل عديـد الببتيد !) .

و توجد مشكلة أخرى، فالجهاز المناعى يمكنة تصنيع جزيئات جسم مضاد قادرة على الأرتباط فعلا بأي مادة غريبة ذات ثلاثة أبعاد متناسقة تقدم إليها ويشمل هذا جزيئات لم يسبق لها أن تصادمت أثناء دور تطور الفقاريات، إلى أن تمكن عالم كيمياء عضوية من تخليقها. وكيف يمكننا أن نفسر إبقاء جينات لأجسام مضادة في المجموع الجيني ضد الجزيئات التي لم يسبق للفقاريات أن تعرضت لها من قبل؟

والحل الممكن لهذه المشكلة هو أن نفترض أن الجهاز المناعى في فرد من الأفراد له القدرة على الأستمرار في تجميع وإختبار أنواع جديدة من المناطق (V) أثناء طول حياة الأنسان. ومثل هذا المولد الجسماني (Somatic) للتنوع (التعدد)، يمكن أن يكون له الأثر في قدرة الحيوان على تصنيع مواقع ربط أنتيجينية لأي تناسق جزيئى، حتى إذا لم يكن قد سبق للنوع التصادم معه.

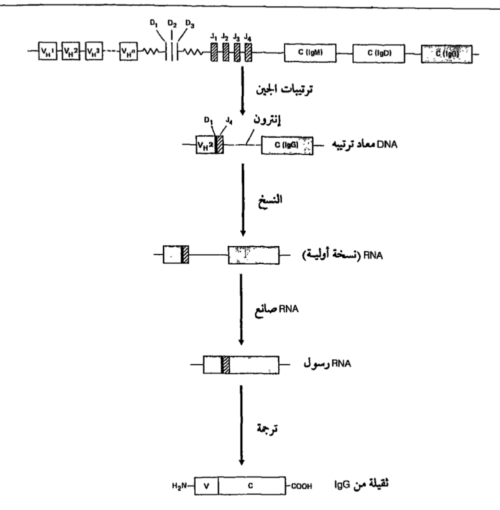
ولقد نجح التقدم الحديث في علم الوراثة الجزيئية، الذي ذكر مبسطا في الباب

الرابع عشر، في توضيح الآليات التي بها يتولد تنوع الجسم المضاد، كما إتضح أنه توجد وسائل ميكانيكية لها دخل في الموضوع. فيوجد عدد كبير من الجينات التي تعمل الدليل الأصطلاحى للمناطق (V) ولكن العدد يقدر بالمئات وليس بالالاف. وتوجد حفنة قليلة (نحو ١٢) من الجينات التي تعمل الدليل الأصطلاحى للمناطق (C). وأثناء التشكل (الأختـلاف) في الخلايا الليمفاوية (ب)، فان المعلومات الوراثية لمنطقة (V) واحدة وجين واحد في المنطقة (C) تتحد في وحدة واحدة للنقش (الكتابة) في (mRNA) (الشكل ٢٤-١٨)، وتحدث هذه العملية بصورة مستقلة لسلسلة ثقيلة وأخرى خفيفة. وفي الحقيقة، فان جينات السلاسل الثقيلة وكذلك جينات السلاسل الخفيفة توجد على كروموسومات منفصلة.

وأظهرت تجمعات (DNA) وطرق دراسة التتابع عدة آليات والتي بها يمكـن لعدة مئات قليلة من الجينـات في المناطق (V) أن تتسبب في ظهـور العديد من خواص الجسم المضاد. فالـ (DNA) الذي يعمل الدليل الأصطلاحي للمنطقة (V) في السلاسل الثقيلة يكـون مكدساً في ثلاث حلقات منفصلة: (١) حلقة كبيـرة (V) والتي تعمل الدليل الأصطلاحـي للأحمـاض الأمينيـة فـي المنطقـة (V) (تقريبا نحو ٩٨ منها) لأعلى حتى إبتـداء ثلث المنـطقــة الفـوق متغـيرة؛ (٢) واحـدة متغـيرة (D) والتي تعمل الدليل الأصـطلاحي لعـدد قليـل من الأحماض الأمينيـة في المنطقـة الثالثـة الفوق متغيـرة وميزان المنطقة (V) وهذه الحلقـة من ال (DNA) تسمى بحلقة الألتحام أو (الحلقـة (J) لأنها تعمل في خلايا البلازما على إلتحام المنطقة (C) بالمنطقة (V) (الشكل ٢٤-١٨).

وتعمـل حلقـة الجـين (D) وكذلك جزء من حلقة الجين (J) الدليل الأصطلاحي للمنطقة الثالثة الفوق متنوعة - وهي منطقة تعلب دوراً رئيسياً في تحديـد خاصية الربط - الأنتيجيني للجسم المضــاد. ويوجد عدد (ربما ٦) من مناطق (J) المختلفة يمكن الحصول عليها، وهذه تبدو على أنها قادرة على الألتحام مع أي منطقة (V). ولم يعرف بعد عدد الحلقـات (D) الموجودة، ولكن لو كان هذا العدد صغيرا، فالقدرة على الترتيب العشوائي لحلقات هذه الجينات تزيد بشدة فرص صنع مواقع مختلفة للأتحاد - الأنتيجيني.

والموقف بالنسبة للسلاسل الخفيفة ليس بهذا التعقيد، ففي مناطق (V) في السلسلة



الشكل ٢٤-١٨ : تنظيم الجينات وحلقات الجينات المستخدمة في تكوين السلسلة الثقيلة لجزيء IgG وأعادة ترتيب الجين يجمع أحد الجينات v الكثيرة، وواحد من العديد من حلقات الجينات J, D ، وواحد من أربعة جينات C لأجل IgG. ونسخ وانتاج RNA ينتج جزيئات mRNA والتي تترجم فيها السلسلة الثقيلة. الانترونات العديدة التي تشق Split الجينـات C لا ترى في الشكل.

الخفيفة يتم عمل الدليل الأصطلاحي بواسطة الجين (V) و واحد من أربعة جينات (J) مختلفة. وحتى هنا، فان فرصة الألتحام بأربعة حلقات من جينات مختلفة من (J) مع ١٠٠ جين (V) مختلف يعطى ٤٠٠ سلسلة خفيفة مختلفة.

وفي الخلايا التي تنتـج أجساما مضادة، فان أجزاء الـ (DNA) التي تكون الدليل الأصطلاحي للمناطق C, J, D, V تكون موجودة في مناطق منفصلة. وفي خلية البلازما، على أية حال، فالـ (DNA) المكـــون للدليل الأصـطلاحي للـ J, D, V. (J, V فقط في السلاسل الخفيفـة) يكون أمتدادا مستمرا للنقش (الحفـر) في الـ (mRNA)، وعلى أية

حال، فالنقطة بالضبط التي تتحد عندها مع بعضها البعض الـ (DNA) للمناطق J, D, V يمكن أن تختلـف عند القليل من النيوكليوتيـدات (Nucleotides) ويزودنا هذا بفـرص أكـبر للتنوع التركيبي في المنطقة الثالثة الفوق - متنوعة، عن طريق إدخال تغييرات في طولها وتتابعها.

وإذا ما كان هذا غير كاف، فيوجـد الأن دليل واضح على أن الطفرات النقطية الجسميـة تساهم أيضا في تنوع الأجسام المضادة. وتحتوي الجينات (V) (J) المتجمعة من الخلايا البلازمية عادة على تغيرات قليلة من النيوكليوتيد والتي لا توجد في النسخة Version الجينية لهذه الجينات. وكثير من هذه التغيرات النيوكليوتيدية مبرمجة إصطلاحيا لعدد مختلف من الحمض الأميني مع أغلب بدائل الحمض الأميني الموجـود في المناطق الثلاثة الفوق - متنوعة.

وبينما يبقى الكثير من التفصيلات التي يراد الكشف عنها، فالأساس الوراثي لتنوع الجسم المضادة أصبح الأن واضحا. وبأستخدام كمية متواضعة فقط من الـ (DNA) فان تعداد الخلايا الليمفاوية في الجسم يمكنه تجميع جزيئات جسم مضاد قادرة على الأرتباط مع أي حاسم أنتيجيني حقيقي والذي قد يتعرض له الجهاز المناعى. ويمكن للخلايا الليمفاوية أن تفعل ذلك بالوسائل التالية:

١ ـ تجميع مجاميع مختلفـة من الحلقـات الجينية للـ J, D, V (للسـلاسل الثقيلة)، والحلقـات V و J (للسلاسل الخفيفة).

٢ ـ تقـديـم طفـرات نقطيـة في الحلقـات الجينية J, D, V عندما تنتج هذه بدائل الحمض الأميني في المناطق الفوق - مختلفة، وتنشأ أماكن إرتباط أنتيجيني متغيرة.

٣ ـ إتحـاد أجـزاء مختلفة من السلاسل الثقيلة والخفيفة عند صنع جزيء الجسم المضاد المتكامل. وتساهم كلا من السلاسل الثقيلة والخفيفة في تكوين موقع (مكان) الأرتباط - الأنتيجيني.

وقد بين أكتشاف الأساس الوراثي لتنوع الأجسام المضادة عواقب قد تذهب أبعد من الجهاز المناعــى . وبكل تاكيـد ، فقد بين هـذا الأســاس الوراثـي أن المجموع الجينـي (الجينوم) هو مكـان أكثر حيوية عما كان يتصورة أي أنســان . وهل تعيـد

الأنـواع الأخرى من الخلايا ترتيب جيناتهـا أثناء تشكلهـا (Differentiation) ؟ لا أحد يعرف ذلك حتى الأن. وربما أن للتحكم الوراثي للأنسجة المناعية طابع خاص مميز؛ ربما لا. ومهما تتمحض عنهـا الأجابـة ، فاننا لم نعد ننظر إلى المجمـوع الجيني (genome) في كائن من الكائنات على أنه موسوعة محفورة في حجر.

٢٤-٩. زراعة الأنسجة وخصوصية الفرد:

TRANSPLANTATION AND THE UNIQUENESS OF THE INDIVIDUAL

تطلبت أولى المحاولات الجادة في المجال الطبي لزراعة أنسجة حية من إنسان إلى إنسـان أخر نقل الدم إلى الضحية التي عانت معاناه شديدة من فقد الدم. وكانت الطريقة أحيانا ناجحة، وأحيانا أخرى تركت أزمة خطيرة، وأحيانا مميتة.

و في عـام ١٩٠٠ ، إكتشـف كارل لانـد شتاينـر (Karl Landsteiner) توضيحاً لتلك النتـائج غير المستقرة، إذ وجد أن مواد أنتيجينية قد تكون موجودة على سطح الخـلايا الـدمـوية الحمراء. وأوائل الخلايا التي تم إكتشافها بواسطة هذا العالم هي الأنتيجينات (أ)، (ب). فالأفراد الذين يحملون خلايا الدم الحمراء وبها الأنتيجين (أ) يقال عنهم أن عندهم مجموعة دم (أ)، الأفراد الذين يحملون الأنتيجين (ب) يتبعون مجموعة الدم (ب). وعند بعض الأفراد كلا الأنتيجينين (مجموعة أب) وغيرهـم والذين يتبعون المجموعة (O) لا يحملون أية أنتيجينات (الشكل ٢٤-١٩).

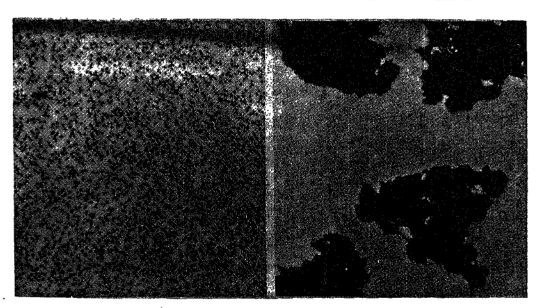
وعند إحضار خلايا دم حمراء تحمل أحد أو كلا الأنتيجينات في ملامسة الأجسام المضادة المماثلة، فانها تتجمع (أي تلتصق مع بعضها البعض) (الشكل ٢٤-٢٠). ويمتلك الأفــراد عادة أجساما مضـادة ضد أنتيجينـات الخـلايا الحمـراء هذه التي يفتقـدونها. ويوضح الشكل (٢٤-١٩) ذلك ويظهر ماهي مجاميع الدم التي يمكن نقلها أو عدم نقلها (للمريض) بأمان. والقاعدة الأساسية التي لابد من ملاحظتها أن الدم الذي ندخله داخل الجسم لا يجب أن يحتوي على خلايا دم حمراء والتي يمكن للأجسـام المضـادة في المريض أن تعمل على تجمعها (تكتلها). وليس من الخطورة الشديدة إذا إحتوى دم المتبرع على أجسام مضادة ضد خلايا الدم الحمـراء في المستـلم لدم المتبـرع ، لأن تلـك الأجسام المضـادة ستخفـف بسرعـة بالبلازما التي تمت فيها عملية الأدخال. وعموما، سميت مجموعة الدم (O) بالمتبرع الشامل (Universal) لأن

الشكل ٢٤-١٩ . مجاميع دم لاند شتاينر (أب و – (ABO) والطرز الجينية التي تنشأ عنها كل مجموعة .

مجموعة الدم	تقريبا ٪ في تعداد الولايات المتحدة	الأنتيجينات على خلايا الحمـــراء	الاجسام المضادة في البلازما	امكانية التبرع الى
أ	٤٢	أ	ضد – ب	أ ، أب
ب	١٠	ب	ضد – أ	ب ، أب
أب	٣	أ + ب	لاشيء	أب
O–	٤٥	لاشيء	ضد أ، ضد ب	O ، أ، ب، أب

امكانية أخذ الدم من	الطرز الجينية		
O ، أ	أ أ	أو	Oأ
O ، ب	ب ب	أو	ب O
O ، أ، ب، أب		أب	
O –		OO	

خلايا الـدم الحمـراء (O) لا يمكنها التجمع وتصبح الأجسام المضادة بسرعة مخففة بواسطة بلازما المستلم. ومشابها لذلك، فان الدم (اب) يسمى بالمستلم الشامل (Uni- versal recipient) لأنـه لا يحتوي على أجسام مضادة تجعل خلايا الدم الحمراء التي أدخل فيها دم المجموعة المذكورة (اب) تتكتل. وعمليا، على أية حال، يفضل الأطباء إختبار مجاميع الدم بالضبط عند القيام بعملية نقل دم، ومجاميع دم لاند شتاينر تورث، ويتحكم في المجمـوعـة جينـان متضـادان (Two Alleles) أحدهما مورث من كل من الأبوين. وعلى أية حال، توجد ثلاثـة جينات متضادة، ا، ب، O ، موجودة في التعداد ككـل . ويوضح الشكل (٢٤-١٩) الطرز الجينية (genotypes) التي تنتج كل مجموعة من مجاميع الدم. وعلى سبيل المثال، فالأفراد الذين يحملون أيا من AO أو AA يكون عندهم أنتيجينات أ على خلايا الدم الحمراء وبالتالي مجموعة ا. وفقط الشكل الجيني اب ينتج كلا الأنتيجينين ا، ب ومعنى ذلك مجموعة الدم اب.



الشكل ٢٤-٢٠ : خلايا دم حمراء قبل (يسار) وبعد (يمين) اضافة السيرم المحتوي على مضاد -أ- أجسام مضادة. التفاعل التجمعي يدل على وجود الأنتيجن أ على الخلايا.

ويمكنك أن تستغرب لماذا نمتلك أجساما مضادة ضد أنتيجينات الخلايا الحمراء التي تنقصنا، والأجابة ليست مؤكدة تماما. وربما نكون معرضين لمواد (في غذائنا. أو من العدوى أو من بكتيريا تعيش في أمعائنا) والتي لها محددات أنتيجينية تشابه أ، ب. ويجب أن نستمر في تخليق أجسام مضادة ضدهم إذا لم تتشابه مع نفسها، ولكن يجب أن نستمر في تخليق تلك الأجسام المضادة إذا تشابهت. وبكل تأكيد فان المواد التي تحمل محددات مشابه -ا أو مشابه - ب تتراجع من وقت لأخر، على سبيل المثال، مثل الملوثات في الأمصال.

وتعتبر عمليات نقل الدم مثالا خاصا ومحدودا لزراعة الأنسجة، وتتلاشى بعد ثلاث إلى أربع أسابيع الخلايا المنقولة من المستلم. ولكن ماذا عن زراعة الأعضاء مثل، الكلية أو القلب، التي نتمنى أن تستمر حية في عائلها الجديد إلى ما لانهاية؟ في عام ١٩٥٦ م، زرعت كلية مأخوذة من إمرأة شابة سليمة إلى توأمتها المشابهة لها تماما، وأنقذت حياة المستلم واليوم تعيش المرأتان في صحة جيدة. وعلى أية حال، فانه عند زرع الكلية بين أناس ليسوا توائم متشابهة، فان نتيجة أن يعيشوا حياة طويلة ناجحة ليست سهلة.

وإذا ما فصلنا قطعة من الجلد من فأر من سلالة معينة و وضعناها في مكان مجهز لها

على فأر من سلالة أخرى، يسير الطعم في مبدأ الأمر جيدا، إذ تنمو الأوعية الدموية للعائل في هذا الطعم، ويقوم الطعم (قطعة الجلد المزروعة) بوظائفه طبيعيا. وبعد نحو ١٤-١٥ يوما بعد العملية، على أية حال، تتحول الأمور إلى الأسوأ، إذ ينقطع إمداد الدم إلى الطعم ويتلاشى الطعم نفسه تدريجيا، وأخيرا، يسقط (ينزع) الطعم كخرقة قديمة.

والدليل على طبيعة ظاهرة الرفض هذه يمكن الحصول عليه باجراء التجربة مرة ثانية. فإذا ما وضعنا ثانية الطعم مع الجلد من فأر من سلالة ثالثة ستكرر القصة نفسها. ولكن إذا حاولنا ثانية مع جلد من سلالة المتبرع الأصلي قد لا يستمر الطعم مدة كافية تمكنه من الحصول على إمدادات الدم، ويتم رفضة في مدة أقصر (٥-٦ أيام) وتبدو ظاهرة المجموعة-الثانية هذه وكأنها مطابقة لأستجابة الذاكرة الثانوية والتي ناقشناها سابقا.

ورفض الطعم هو إستجابة لمناعة وسيط-خلوى، فالحقنة من الخلايا الليمفاوية (ت) من فأر كان قد رفض طعما لجلد (ا) يمكن الفأر المستلم من تجهيز مجموعة ثانية (Second-set) من رد الفعل ضد طعمه الأول الجلد (ا). وتتعرف الخلايا الليمفاوية (ت) على الطعم الغريب، بتشغيل خلايا أخرى في الجهاز الدورى (أساسا المونوسايتس)، تعمل على قتل خلايا الطعم.

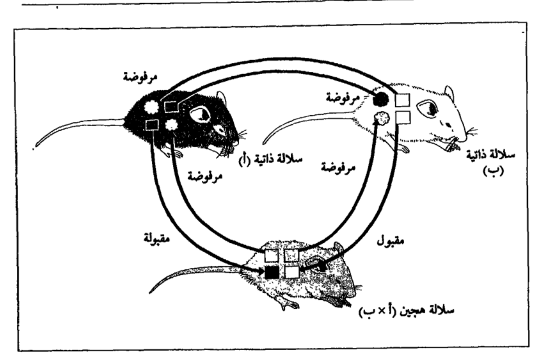
وإزداد تفهمنا لطريقة رفض الطعم بأختبار حالات لم يحدث فيها الرفض. أولا، كما رأينا، فالتطعيم بين الأفراد المتماثلين وراثيا لا يرفض، ويمكن ملاحظة ذلك في توائم الإنسان المتماثلة وكذلك في سلالات الفئران والتي ربيت بين بعضها البعض (Inbred) لمدة طويلة بحيث أصبحت كل الأفراد فعلا متماثلة، حتى ولو أنهم نشأوا من بيض منفصل. [وحتى بين مثل هذه الفئران يحدث الرفض عند تطعيم جلد ذكر (Xy) على أنثى (xx) ولكن ليس العكس. وبسبب الكروموسوم Y فان جلد الذكر عنده جينات لا توجد في جلد الأنثى وبهذا الإستثناء، فان هذه الكائنات تعتبر متشابهة اللاحقة (Homozygous) وبذلك، فان الأنثى ليس بها جينات غريبة عن الذكور].

فاذا ما ربينا فأرا من سلالة (ا) مرباة داخليا (Inbred) من فأر أخر مربى بنفس الطريقة من سلالة (ت)، فان الجيل الأول الناتج (F_1) يتقبل الطعوم من بعضها

البعض وكذلك من أبوى كلا السلالتين (الشكل ٢٤-٢١). وعلى أية حال فان كلا من أبوى السلالتين لن يتقبل طعما من أفراد الجيـل الأول (F_1) وتدل هذه النتائج على أنه أينما وجدت / إختلافات وراثية، توجد أيضا إختلافات أنتيجينية. وفي هذا الضوء، يمكننا أن نرى الجهاز المناعى كجهاز يمكنه التعرف على وحدة (أي فريد من نوعة) الفرد ويعمل على الحفاظ عليه بهذه الحالة.

ومـاذا يمكننـا عمله للأفراد الذيـن يحتاجـون بفارغ الصبر لكلية جديـدة ولكن ليـس لهم تـوأم ممـاثل يمكنهـم اللجـوء إليـه ؟ يوجد الآن إتجـاهـان أثبتا كفاءتهمـا العمليـة في جعل زراعـة الكليـة التي أعادت آلافـا من البشـر إلى فتـرات لا بـأس بهـا من الصحـة الجيدة. وأحد هذين الأتجاهين هو الطباعة النسيجة (Tissue Printing) ومناظرة دم بمجاميع ABO (وكذلك Rh) يسمح بنجاح نقل الدم ولو حتى في حالة وجود الكثير من أنتيجينات خلايا الدم الحمراء الأخرى. فبينما يمكن للأنتيجينات B, A إثـارة تفـاعـلات خطيرة فالأنتيجينـات الأخـرى (مثل MN) تكون ضعيفة جدا من النـاحية الأنتيجينية بحيث أنه لا تنتج مشاكل من عدم المناظرة. وبنفس الطريقة، فالأنتيجينـات التي يتعرف عليها الجهاز المناعى على سطح خلايا الأعضاء المزروعة يمكن أن تميز بأنها قوية أو ضعيفة. وتعمل ميكانيكية الرفض بصورة أقوى بكثير ضد الأنتيجينات القوية عما تعمله ضد الضعيفة. ولو أن المنظارة المثلى لكل الأنتيجينات ربما قد تكون ممكنه بين التوائم المتماثلة، وتكون تلك المناظرة جيدة نوعا على الأقل بالنسبة إلى الأنتيجينات القوية - ويمكن عملها، وخاصة بين أفراد نفس العائلة.

ومن النادر جدا، أن يولد طفل بدون جهاز مناعة بالمرة، إذ لا يمكن للطفل أن يصنع الخلايا الليمفاوية (ب) أو الخلايا الليمفاوية (ت) وبالتالي لا يمكنه الحصول على الأستجابة المناعية الوسيط-خلوية أو مناعة سائل الجسم. ومثل هذا الطفل مقضى عليه بالموت بسبب الأوبئة إلا: (١) تربيتة في بيئة معقمة كلية أو (٢) إعطائه جهاز مناعة بحقنه بخلايا نخاع العظام (وهو منبع جميع الخلايا البيضاء) مأخوذة من متبرع سليم الصحـة، وهـو في العادة أخ أو أخت. وفي هذه الحالة، يمكنك أن تتنبأ أن الطباعة النسيجية لا داعى لها، طالما أن المتلقى (المستلم) لا يمتلك الميكانيكية التي تمكنه من تدمير النسيج المنزرع. وفي الحقيقة، فان الطباعة النسيجية هامة كذلك في هذه الحالة. وإذا ما وجدت إختلافات أنتيجينية قوية بين العائل والعضو المنزرع، فان



الشكل ٢٤-٢١ : قدر طعوم الجلد بين سلالتين من الفئران (أ + ب) مربيتان ذاتيا والجيل الأول F_1 (سلالة تزاوجية). وأشكال الأبوين ترفض جلد كلا منهما وكذلك جلد من نسلهما لأنه في كل حالة فهي تحتوي على أنتيجينات غريبة. والنسل، على أية حال، سيقبل طعوم الجلد من كلا سلالات الأبـوين والتي ورثت جينـاتهـا، وبالتالي أنتيجينات الأبوين. وأفراد سلالة فئران مرباه ذاتيا لهي متشابهة وراثيا وبالتالي، مثل التوائم المتماثلة، تقبل الطعوم من بعضها البعض.

العضو المنزرع يكتشف تلك الأختلافات ويحصـل على إستجابـة مناعيـة ضد العائل . ومثل هذا التفـاعل الطعم مقابل العائل "graft versus host" مميت في العادة. ولو أن ما يوضحة تجاوب مشكلة الطرد العادية. فللمرة الثانية فان الدور الأساسي الذي تقوم به ميكانيكية المناعة هو التعرف على الغير "Nonself" وتدميرة.

والطريقة الأخرى التي يمكن بها تقليل ميكانيكية طرد الطعم هو معاملة المتلقى (المستلم) بالعقاقير التي تمنع الأستجابة المناعية. وبسبب الحاجة للتكاثر (الأنقسام) السريع للخلايا أثناء الأستجابة المناعية، فأي عقار يوقف الأنقسام الغير مباشر يثبط الأستجابة.

وطالما أصبح إستخدام مثبطات المناعة غير ضروري لتمكن متلقى الأعضاء المنزرعة من الأحتفـاظ بالكلية الجـديدة أوا لقلب الجـديد لمدة غير محدودة من الوقت، فان إستخدام هذه العقاقير قد خلق مشاكل جديدة. والعقاقير الميسر الحصول عليها الأن

ليست بأي حال من الأحوال متخصصة في فعلها. وكلما زادت فعاليتها في تثبيط طرد الطعوم، كلما زادت فعاليتها في تثبيط الأستجابة المناعية من مهاجمة البكتيريا، والفطر، والفـيروسـات. وبينـما نجـد أن المضـادات الحيوية وعقـاقير أخرى تساعد في حالة الأصابات البكتيرية والفطرية إلا أن الأصابات الفيروسية لا تخضع لمثل هذا العلاج وبذلك قد تصبح تهديداً دائماً للحياة.

٢٤-١٠. السرطان والحد من إنتشاره مناعيا:
CANCER AND IMMUNE SURVEILLANCE

والتعقيد الأخر الذي يظهر عند إجراء عمليات زرع في المتلقين (Recipients) هو التعقيد الغـير مناسب الذي يحدث في السرطان. ففي بعض الحالات تكون خلايا السرطان من مصدر فرد متبرع، وزرعت بدون قصد مع العضو المنزرع. والعلاج في تلك الحـالات يعتبر بسيطا: إيقاف أستخدام العقاقير المثبطة للمناعة، وعندئذ فان ميكانيكية الطرد في العائل تدمر الخلايا السرطانية [ويطرد العضو المنزرع كذلك].

وفي معظم الأوقات، على أية حال، فان السرطان ينشأ من العائل نفسه. فلماذا إذن نجد أن المتلقين الذين أجريت لهم عمليات زرع في خطر أكبر من نشوء السرطان؟ فهل يمكن أن يعود ذلك إلى حالة تثبيط المناعة؟ ويحصل هذا الأحتمال على القبول عندما نلاحظ وجود عدد مختلف من الأمراض الوراثية تتميز بأستجابة مناعية فقيرة والتي تكون كذلك مصحوبة بحالات مرتفعة غير مناسبة من السرطان. ولربما، إذن، أن تكون إحدى وظائف الميكانيكية المناعية هي تدمير الخلايا السرطانية. وإذا كان كذلك، لابد أن نتوقع أنه يمكن التعرف على مثل هذه الخلايا بواسطة الجهاز المناعى كغريب وحتى لو كان منشؤهم من الشخص نفسـه "Self" فهل يوجد إذن أي دليل على أن خلايا السرطان تحمل محددات أنتيجينية غير موجودة على الخلايا الأخرى العادية للعائل؟

وإن سهولة الحصول على سلالات فئران مرباه مع بعضها البعض (Inbred) والمواد الكيميائية التي يمكنها إحداث عدوى السرطان في تلك الفئران قد أمدتنا بالوسائل التي يمكن بها إختبار هذه الفكرة. ولقد رأينا أن فأرا يتقبل كنفسه "As self" طعم جلد من فأر آخر من نفس السلالـة المرباة ذاتيـًا (inbred) فهل مثل هذا الفأر يتقبل أيضا كنفسه "as self" ورما سرطانيا من مثل هذا الفأر الآخر؟ والأجابة لا. فقد ينمو ورم سرطاني

منزرع بسرعة كبيرة لدرجة أنه يقتل العائل قبل أن يستطيع هذا العائل أن يحصل على هجوم مناعى فعال. وبالرغم من ذلك، فالالة موجودة، فاذا ما إستؤصل مثل هذا الورم السرطاني المنزرع قبل أن يقتل عائلة، أو إذا ما حقن العائل أولا بخلايا ورم سرطاني ميت ، فانه قد يكون للعائل الفرصة في أن يستعد لمجموعة ثانية "Sec-ond set" من المقاومة (رد الفعل). ثم، عند إعادة زرع الورم السرطاني، فانه يطرد بسرعة. وتوضح قدرة المتلقى على التعرف على خلايا الورم السرطاني من نفس سلالته على أنها غريبة (Foreign) بينما يتقبل الأنسجة العادية من هذه السلالة ك "Self" أي منه نفسه، أي أن هذه السرطانات تحمل محددات أنتيجينية جديدة.

وكثير من الأورام السرطانية في حيوانات التجارب والبعض الأخر، ربما، في الإنسان أحدثتها الفيروسات. وفي هذه الحالات، أيضا، تحمل الخلايا السرطانية محددات أنتيجينية على سطحها والتي تعتبر غريبة بالنسبة للعائل. والمسببات المعروفة المحدثة للسرطان (مثل الإشعاع، والكثير من المواد الكيميائية، والكثير من الفيروسات) منتشرة بشكل واسع في البيئة المحيطة بنا. وبفرض ان السرطان يبدأ كخلية واحدة شاذة (ضالة) فيمكننا إذن أن نشك أن إحدى وظائف ميكانيكية المناعة هي التعرف على تلك الخلايا الشاذة وذريتها وتدميرها قبل أن تجد الوقت لتنمو وتكون ورما سرطانيا واضحا. مثل هذه الوظيفة وصفت بأنها الحد من الانتشار المناعى (Immune Surveillance).

وإذا كان ذلك هو الحال، لماذا نتعرض للسرطان ؟ توجد عدة إحتمالات يزداد فيها الوقوع في الأصابة بالسرطان (بعد قمة صغيرة أثناء الطفولة) بتقدم العمر، وتقل كفاءة ميكانيكية المناعة (كما هو مع الكثير من ألات الجسمى أنظر قسم ١٩-٥) مع تقدم السنين. وعلاوة على ذلك، فالكثير من المواد الكيميائية والمعروفة بتسببها للسرطان. (كالمواد الهيدروكربونية مثل البنزوبيرين - أنظر قسم ٢١-١٠) هي أيضا مثبطة للمناعة. وينطبق نفس الشيء على بعض الفيروسات المسببة للسرطان وربما يكون جزء من القاعدة الأساسية للنشاط السرطاني لهذه العوامل هو كفاءتها في تثبيط الحد من الأنتشار المناعى.

وقد تكون الميكانيكية المناعية نفسها مسئولة عن الحد من الأنتشار المناعى ونجاح الورم السرطاني في حصوله على اليد العليا. وعمليا طرد الورم السرطاني، مثل طرد

الطعم، هو أساسا عمل تخصصى للخلايا الليمفاوية (ت) التي تقود الهجوم على الخلايا الغريبة . وتبدو الأجسام المضادة التي تدور في مجرى الدم وكأنها عديمة المساعدة في العملية ولربما في الحقيقة، تكون ضارة وتوجد أدلة كبيرة على أن نوع كل (أنواع من الأجسام المضادة الدائرة في مجرى الدم قد تمنع ظاهرة الطرد بأتحادها مع المحددات على الخلايا الغريبة . وبعملها هذا، فهي تغطى أو تحيط بهذه المحددات حتى تجعلها غير قادرة على إحداث عملية الطرد المتسببة عن الخلايا الوسيطة، وقد تنشأ بهذه الطريقة حالة إحتمال لظهور الورم السرطاني.

٢٤-١١ : أمراض الحساسية ALLERGIES

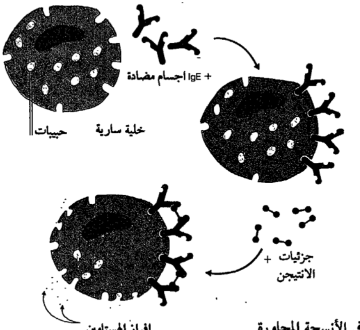
لا يمكننا أن نعيش بدون جهاز مناعى فعال. ومع ذلك، توجد حالات (مثل، عندما تتناول طعامك بالخارج وسط حفنة من نبات الأيفى - Ivy - السام) عندما يبدو أن الجهاز المناعى يناله بعض المشاكل. فالحساسية لنبات أيفى السام هي إستجابة مناعية. لهذا، أيضا، يوجد رد الفعل الغيرسار الذي يعاني منه بعضنا بعد تناول غذاء معين (مثل القواقع، الفراولة) أو إستنشاق حبوب لقاح من نباتات معينة (مثل حشيشة rag-weed، وكثير غيرها من الحشائش). وكل من هذه الإستجابات المناعية هو مثال للحساسية (Allergy) وكلها تبتدىء بمحدد أنتيجيني خاص واحد أو أكثر. وتوجد عدة أجهزة ميكانيكية مناعية تسبب الحساسية. وتلعب الخلايا الليمفاوية (ت) أهم دور في بعض من تلك الحساسية (مثل رد الفعل بالنسبة لنبات الأيفى السام)؛ والأجسام المضادة هي الجانية في أنواع حساسية أخرى . ولنختبر الآن أحد أمراض الحساسية والأكثر شهرة والذي ينتج بسبب وساطة الجسم المضاد: حمى القش (Hay Fever).

ولقد أكدنا عند مناقشاتنا للجهاز المناعى حتى الأن على مناقشة الأجسام المضادة التي تدور في بلازما الدم. وعلى أية حال، توجد تلك الأجسام المضادة في أماكن أخرى في الجسم . ويرتبط نوع واحد من الأجسام المضادة يعرف بأسم IgE بقوة بسطح خلايا أنسجة تسمى خلايا السارية (Mast cells) (ويرتبط أيضا بخلايا كريات الدم البيضاء محبات الأساس Basophils - أنظر الشكل ٢٣-١١). وللأجسام المضادة (IgE) مستقبلات موجودة على المنطقة الثابتة في سلالها الثقيلة والتي تتحد مع

مستقبلات على الخلايا السارية (الشكل ٢٤-٢٢). وهذه الأجسام المضادة ذات الأرتباط الخلوى (Cell-bound) لا يظهر لها أي تأثير وحتى إذا لم تتقابل مع حواسم أنتيجينية فانه يمكنها أن تتحد مع مواقع الأرتباط الأنتيجينية. وعندما يحدث ذلك، فان الخلايا السارية والتي ترتبط معها بطريقة قابلة للأنفجار تتفرع حبيباتها السيتوبلازمية (الشكل ٢٤-٢٢). والمكون الرئيسي في تلك الحبيبات هو الهستامين. ويسبب تحرير الهستامين الأنتفاخ، والأحمرار، والحكة، وغيرها في الأنسجة المحيطة. وفي أثر ذلك، عندئذ، تصبح كل خلية سارية IgE ذات حساسية كقنبلة مشحونة يمكن أن تشتعل وتنفجر بواسطة أنتيجين خاص.

ويميل بعض الأفراد في بيئتهم إلى الأستجابة للأنتيجينات (مثل حبوب اللقاح، الغبار) بأنتاجهم كميات هائلة من الأجسام المضادة من الشكل IgE ونتيجة لذلك ، فالتعرض اللاحق لتلك الأنتيجينات تشحن (Triggers) أي تتسبب في التحرير السريع للهستامين. فاذا ما حدث ذلك في أنسجة الممرات التنفسية وحول الأعين، تظهر كل الأعراض الغير سارة لحمى القش.

ويظهر أن الأستعداد لأنتاج مستويات عالية من الأجسام المضادة (IgE) يكون مورثا، لذلك نجد أن حمى القش، وأية حساسيات أخرى من نفس الشكل تميل إلى



الشكل ٢٤-٢٢ : ميكانيكية الاحساس والاستجابة في الحساسيات مثل حمى القش. والأجسام المضادة من الشكل IgG ترتبط بالخلايا السارية وتجعلها حساسة لأي أنتيجين (مثل، حبوب لقاح حشيشة Ragweed) موجه اليه الأجسام المضادة وعند تعرضها للأنتيجين الحساسة لها، فان الخلايا السارية تفرز الهستامين. ويسبب الهستامين الاحمرار والانتفاخ في الأنسجة المجاورة.

الوجود في العائلات .

وما الذي يمكن عمله لمساعدة هؤلاء الذي يقاسون من أمراض الحساسية؟ تجنب الأنتيجينات له فاعلية ، بالطبع ، ولكنه قد يكون غير عملي ، ويعطى تناول مضاد - الهستامين الراحة للمريض بمنعه تأثير الهستامين ، أو ، يمكن أن يحـاول المرء من تقليل حساسية الضحية ، ويتطلب ذلك الحزم في تكرار إدخال جرعات زائدة بالتدريج من الأنتيجين (أو الأنتيجينات) الخطأ في الجسم أي ، بالحقن . وهدف واحد لهذه الطريقة هو لبنـاء أجسـام مضـادة أخـرى لها نفس الخـاصيـة والتي لا ترتبـط مع الخـلايـا السـاريـة . وإذا تـم هذا البنـاء ، فان تعـداد الأجسام المضـادة الجديد الذي يـدور مع الدم قد يكون قـادراً على تعطيل الأنتيجين قبل وصوله إلى الأنسجة والعمل على تحرير الهستـامين . ولسـوء الحظ فان الأقلال من هـذه الحساسيـة (desensitization) لهو عملية شاقة ، ولا تدوم التأثيرات طويلا .

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

تركـزت دراسـة الأستجابة المناعية لعدة عشرات من السنين علىَ دورها في حماية الفقاريات (ويظهر أن المناعة خاصة كلية بالفقاريات) من مسببات الأمراض المعدية . ولكن يمكننا النظر إلى الأستجابة المناعية بنظرة أوسع . وتمكن ميكانيكية المناعة جسم الحيوان الفقاري من تخليق عدد كبير (لايعرف حتى الأن هذا الكبر) من أنواع مختلفة من جزيئات البروتين. ومن بين تلك المجموعة المتنوعة، يقدر عدد قليل على الأتحاد طبيعيا مع ، على قدر ما يمكننا قوله ، أي شكل جزيئي ذو ثلاثة أبعاد (محدد -Deter minant) والذي يمكـن تدبيـره . وهذه الألـة (Machinery) لا تؤدى عادة إلى تدمير الجـزيئـات الكبيرة والتي هي المكونات العادية للعائل. وتعمل تلك الألة على تثبيط وتدمير الجزيئات الكبيرة التي تدخل البيئة الداخلية من العالم الخارجي . وبعملها هذا ، فهي تقوم بحمايتنا من المسببات المرضية مثل الفيروسات والبكتيريا ، وربما يمكنها أيضا إنتاج أعراض لا تسر من الحساسية عندما تنجح مسببات غير مرضية (مثل حبوب لقاح حشيشة Rag weed) في الدخول إلى الجسم. كما تعمل كذلك على تدمير مجهودات الجـراح المملوءة بالامال عندما يحاول تغيير الأعضاء التالفة في الجسم. ومن الممكن كذلك أن يحاول الجهاز المناعى تدمير الخلايا الشاذة (السرطانية) والتي تنشأ في الجسم .

وبأداء كل هذه الأعمال يتعلم الجهاز من تجاربه وغالبا ما يتكون له قدرة سريعة لمقاومة كل ما يحاول أن ينازله أو يتصادم معه فيها بعد بنفس القوة.

وبذلك تعمل ميكانيكية المناعة على حراسة الجسم ضد الغزاه من الخارج وضد الخلايا السرطانية والتي تهدد بغزونا من الداخل. ومن كلمات بيرنت (F.M. Burnet)وهو واحد من أعظم علماء المناعة في القرن العشرين، تعمل الأستجابة المناعية لحفظ كمال الجسم.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ــ طفل وأمـه كلاهما من فصلية الدم O ، فما هي فيصلة الدم التي يحتمل أن توجد عند الأب.

٢ ــ ضحية حادث ذو فصيلة دم A يجب أن يعطي له دم من متبرع من أي فصيلة دم؟ وما هي فصائل الدم الأخرى الممكن إستخدامها بدون خطورة كبيرة؟

٣ ــ ماهي فصائل الدم المحتملة في أطفال ناتجين من زواج يحمل فيه الأب فصيلة دم من المجموعة O وتحمل الأم فصيلة دم من المجموعة AB ؟

المراجع REFERENCES

1- CAPRA, J.D., and A.B. EDMUNDSON, "The Antibody Combining Site," Scientific American Offprint No. 1350, January, 1977.

2- PORTER, R.R., "The Structure of Antibodies," Scientific American Offprint No. 1083, October, 1967.

3- EDELMAN, G.M., "The Structure and Function of Antibodies," Scientific American, Offprint No. 1185, August, 1970. Edleman and Porter (author of the preceeding article) shared an Nobel Prize in 1972 for their work.

4- Reisfeld R. A., and B. D. KAHAN "Markers of Biological Individuality", Scientific Amerian, Offprint No. 1251, June, 1972. On transplantation antigens.

5- JERNE, N. K., "The Immune System," Scientific American, Offprint No. 1276, Julu, 1973.

6- COOPER, M. D., and A. R. LAWTON III, "The Development of the Immune Systems," Scientific American, Offprint No. 1306, November, 1974.

7- PORTER, R. R., Chemical Aspects of Imunology, Carolina Biology Readers, No. 85, Scientific Publication Division, Carolina Biological Supply Company, Burlington, N.C., 1976.

8- RAFF, M. C., "Cell-Surface Immunology," Scientific American, Offprint No. 1388, May, 1976.

9- LEDER, PHILIP, "The Genetics of Antibody Diversity," Scientific American, Offprint No. 1518, May, 1982. A superb account by one of the major contributors to the subject.

10- CLARKE, C. A., "The Prevention of the Rhesus Babies" Scientific American, Offprint No. 1126, November, 1968.

11- OLD, L. J,. "Cancer Immunology," Scientific American, Offprint No. 358, May, 1977.

12- ROSE, N.R., "Autoimmune Diseases," Scientific American, Offprint No. 1491, February, 1981. Describes how the immune system can on Occasions mount an attack against "self" components.

13- KIMBALL, JOHN W., Introduction to Immunology, Macmillan, New York, 1983.

14- BUISSERT, P.D., "Allergy," Scientific American, Offprint No. 1522, August, 1982.

CHAPTER 25 الباب الخامس والعشرون

الاخراج والحفاظ على مكونات وخواص السائل الخلوى الزائد
EXCRETION AND HOMEOSTASIS

EXERCISES AND PROBLEMS | تمارين ومسائل

REFERENCES | المراجع

الباب الخامس والعشرون

الاخراج والحفاظ على مكونات وخواص السائل الخلوي الزائد

قمنا في الأبواب السابقة من الجزء السادس بشرح الوسائل التي يمكن بها للكائنات الحية: (١) الحصول على المواد (والطاقة) من بيئتها، (٢) نقل المواد في داخل أجسامها، (٣) تحول تلك المواد داخل خلاياها. وكل تلك العمليات جزء من التمثيل الغذائي للكائن. ولتكملة قصتنا عن التمثيل الغذائي، لابد ان نختبر الان الوسائل التي تعيد بها تلك الاشياء الحية منتجاتها من الفضلات إلى البيئة. وعلى العموم، فأغلب فضلات التمثيل الغذائي هي ثاني اكسيد الكربون، الماء، الأمونيا. وهذه المواد لا يجب إعتبارها، على أية حال، ببساطة كفضلات. فكل منها له أدوار هامة يقوم بها في تنظيم أنشطة الجسم (نذكر، على سبيل المثال، تأثير ثاني أكسيد الكربون على معدل التنفس) وكذلك في عمليات التخليق الغذائي المختلفة في الخلية. وحتى الأمونيا، وهي مادة سامة جدا، عامل هام في عدد من التغيرات الكيميائية الحيوية للتمثيل الغذائي للأحماض الأمينية. ولذلك، فقط عندما تتجمع تلك المواد بمستويات زائدة عن حاجة الكائن، فيجب التخلص منها. وعودة هذه المنتجات التي نحتاج اليها في عمليات التمثيل الغذائي إلى البيئة تسمى بعملية الاخراج (Excretion).وكما سبق لنا دراسة (في الباب الحادي والعشرين) الوسائل التي تعيد بها النباتات والحيوانات الفضلات الغازية إلى البيئة، فسوف لا نهتم بها كثيرا في الدراسة الحالية.

٢٥-١. الاخراج في النباتات: EXCRETION IN PLANTS

لايعرضنا الاخراج في النباتات إلى أية مشاكل خطيرة، وتوجد عدة أسباب لذلك. أولا، أن معدل الهدم catabolism في النباتات عموما أقل بكثير عنه في الحيوانات من

نفس الوزن. وبالتالي، فان فضلات الأيض في النباتات تتجمع ببطء أكبر. وثانياً، تستخدم النباتات الخضراء الكثير من فضلات منتجات التحولات الغذائية بها في عمليات التجديد الخلوى. ويستخدم الماء وثاني أكسيد الكربون، الناتجان من عملية التنفس، في عملية البناء الضوئي. ويمكن إستخدام مركبات الفضلات النيتروجينية، والتي تريح الحيوانات كثيرا بالتخلص منها، بالنباتات الخضراء في تخليق بروتين جديد. وأخيراً، يعتمد الأيض في النباتات أساسا على الكربوهيدراتات أكثر من إعتمادة على البروتينات، وهذا يقلل من متطلباتها الاخراجية، إذ أن المنتجات النهائية للتمثيل الغذائي للكربوهيدراتات أقل سمية بكثير من الفضلات النتروجينية الناتجة عن التمثيل الغذائي للبروتينات. وبطبيعة الحال تنتج النباتات بروتينا، الذي يصنع منه تركيبات خلوية متعددة هامة وكذلك جميع إنزيماتها. وبالرغم من ذلك، يلعب التمثيل الغذائي للبروتين دورا أقل بكثير في النباتات عنه في الحيوانات، الذي يعتمد تركيب جسمها العام بدرجة كبيرة جداً على البروتين.

وفي النباتات المائية، تكون فضلات الأيض حرة في الانتشار من السيتوبلازم إلى المياه المحيطة. ولا توجد خلية بعيدة عن الماء كما أن تركيز الفضلات داخل الخلية يزيد عن تركيزها في الماء. وناتج الأيض الوحيد الذي لا تشملة هذه الحقيقة هو الماء نفسه. وتعيش نباتات المياة العذبة محاطة بماء يزيد تركيزة كثيرا عن الماء الموجود داخل سيتوبلازم تلك النباتات. ولا يوقف هذا فقط الانتشار (الضغط الاسموزي) كوسيلة للتخلص من الفضلات المائية، لكن (وهو أهم بكثير) يعرض تلك النباتات إلى دخول تيار مستمر من الماء من البيئة. وبدخول الماء إلى الخلايا بالضغط الاسموزي، يزداد الضغط داخل الخلايا بسرعة. ويتحمل جدار الخلية السليلوزي الضلب هذا الضغط ويحدث الإمتلاء. وعندما يصبح الضغط داخل الخلية معادلا للضغط الاسموزي، يحدث التوازن بين محتويات الخلية (وخاصة الفجوة المركزية) والبيئة.

وفي النباتات الأرضية، تخزن فضلات نواتج الأيض، كالأملاح والأحماض العضوية، ببساطة في النبات. وقد تخزن تلك الفضلات على هيئة حالة صلبة كأشكال بللورية أو قد تذوب في سائل الفجوة المركزية. وفي الأنواع العشبية، تبقى تلك الفضلات ببساطة في الخلايا إلى أن يحين موت قمم النباتات في الخريف. وفي النباتات المعمرة، توضع الفضلات في الخشب الصميمي الميت ويتم التخلص منها عند سقوط الأوراق.

٢٥-٢ . الاخراج في الأميبا: EXCRETION IN THE AMOEBA

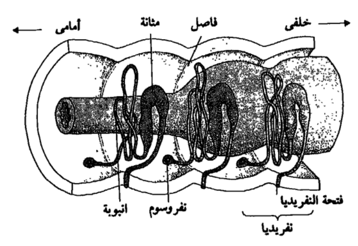
تعيش الأميبا وغيرها من الحيوانات وحيدة الخلية في بيئة مائية وتتخلص من فضلات التمثيل الغذائية بالانتشار تماما كما تفعل النباتات المائية. في الكثير من هذه الحيوانات، فان الناتج النهائي للتمثيل الغذائي للبروتين هو الأمونيا. وهذه المادة (في شكل الايون الخاص بها - ن يد$_{٤}$ +) تنتشر بسلاسة إلى خارج الخلية قبل وصولها إلى تركيز خطير.

وعلى أية حال، لا تستطيع هذه الكائنات التعامل مع الماء الزائد بهذه الوسيلة. وبفقدانها جدار خلوى متين، فانها لا تستطيع مصارعة تيار الماء المستمر الداخل إلى أجسامها ببنائها ما يعوض ذلك. وتحل هذه المشكلة عن طريق الفراغ المنقبض (Con-tractile Vacuole) وتستخدم الطاقة لاجبار الماء على العودة من الخلية إلى خارجها في المياة المحيطة. ومن المحتمل ألا يلعب الفراغ المنقبض أي دور أساسي في التخلص من المواد الاخرى. والأميبات التي تعيش في بيئة متعادلة التوتر (Isotonic) (بحرية أو أشكال متطفلة) تكون خالية من الفراغ المنقبض، عند وضع مثل تلك الأميبات في بيئة قوتها ناقصة التوتر (Hypotonic) على أية حال، قد تنشيء لها فراغا منقبضا. وهذا الدليل يجعلنا نفترض أن الفراغ المنقبض يعمل ببساطة على تنظيم التوازن المائي داخل الكائن.

٢٥-٣. الاخراج في اللافقاريات EXCRETION IN THE INVERTEBRATES

يشبه الجهاز الاخراجي في دودة الارض الجهاز الاخراجي للعديد من الحيوانات الأخرى الفقارية واللافقارية. ولا يعني هذا بالضرورة أن كل تلك الحيوانات قد ورثت التركيب من سلف واحد، لكن قد يعني ذلك أن مثل هذه الميكانيكية ذات الكفاءة قد نشأت أكثر من مرة في مسار التطور الحيواني.

ففي دودة الأرض والكثير غيرها من اللافقاريات، تسمى أجهزة الاخراج هذه باسم النفريديا (Nephridia) (الشكل ٢٥-١). ويوجد زوج من تلك النفريديا في كل حلقة من حلقات دودة الأرض (فيما عدا الثلاث حلقات الأولى والحلقة الأخيرة). وتتكون كل نفريديا من قمع، أهداب ، النفروستوم (Nephrostome) والمثبت على الحاجز، هو الغشاء الذي يفصل بين الحلقات. و يؤدى القمع خلال الحاجز إلى أنبوبة طويلة



الشكل ٢٥-١. الجهاز الأخراجي في دودة الأرض.توجد نفريديا ثانية في كل حلقة. وتلتقط النفريديا السائل المحتوي على الفضلات والمواد النافعة، ولكن تبقى المواد النافعة عند مرور السائل خلال الأنبوبة.

والتي تقع ملتوية في الحلقة الخلفية التالية. ويتضخم الطرف النهائي (الطرف البعيد) للانبوبة ليكون جهازا مؤقتا للتخزين، يسمى بالمثانة. وتفتح المثانة إلى الخارج عن طريق ثقب، هو ثقب النفريديا (Nephridiopore) موجود على السطح السفلي للدودة.

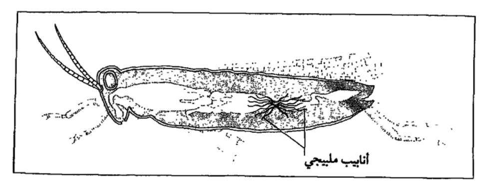
ويقع النفروستوم (وهو القمع) داخل فراغ الجسم، يمتلىء هذا الفراغ بسائل مكون اساسا من ليمف تم ترشيحة من الجهاز الدورى المقفل، وهو (ECF) سائل خلايا جسم دودة الارض، يحتوي على مواد نافعة (مثل الجلوكوز) ومواد ضارة عديمة الفائدة (مثل الفضلات النيتروجينية). ويدخل السائل المذكور النفروستوم ويمر لأسفل الأنبوبة بمساعدة الأهداب وإنقباض عضلات الأنبوبة نفسها وأثناء تحركة، تحتفظ الخلايا المبطنة للأنبوبة بالمواد النافعة للدودة. والأنبوبة مزودة بكثرة بالأوعية الدموية لدرجة أن تلك المواد النافعة توضع ثانية في الدودة. أما عن المواد الغير نافعة أو الفضلات فلا تحتفظ بها الدودة وبالتالي تترك الدودة عن طريق فتحات (ثقوب) النفريديا الخارجية. وسنرى أن الكثير من الحيوانات الأخرى تحل مشاكلها الاخراجية بطريقة مماثلة. وجميع مكونات السائل (ECF) يتم فحصها، فالمواد النافعة تحتفظ بها الدودة بينما المواد المتبقية فلا.

وبالاضافة إلى هذا النشاط الفحصى الاخراجي، فقد تعمل النفريديا كذلك بطريقة أكثر تقدما. إذ يمكن للخلايا الافرازية الموجودة في الأنبوبة أن تنقل الفضلات

من الشعيرات الدموية مباشرة إلى فراغ الأنبوبة، ويطلق على ذلك إسم الاخراج الأنبوبي.

وتـوجـد في الحيوانـات التي تعيش في المياه العـذبـة كميات كافية من المـاء لطرد الفضلات النيتروجينية السامة بعيدا بمجرد تجمعها. و في الحقيقة فان المشكلة الرئيسية لتلك الحيوانات تبدو وكأنها تتوافق مع مشكلة الماء الكثير الذي يدخل إلى اجسامها من البيئة ناقصة التوتر (Hypotonic).وفي الحيوانات الارضية، يختلف الوضع تماما، إذ يجب بـذل كل مجهود للاحتفاظ بالماء. وفي مفصليات الأرجل الارضية، مثل الحشرات، نأخذ أول نظره عن مشكلات الاخراج هذه في بيئة جافة. ويحل النطاط المشكلة عن طريق تحورات تركيبية وكيمياء حيوية. فالفضـلات النيتروجينية للنطاط (والحشرات الأخرى) هي حمض اليوريك. والملاءمة الكيمياء حيوية هامة جدا لأن حمض اليوريك يضم محتوي نيتروجيني مرتفع ذو سمية قليلة. هذه السمية القليلة هي نتيجة جزئية للذوبان البسيط. فبمجرد أن يبدأ تركيز حمض اليوريك في الزيادة نوعا ما، فانه يهبط من السائل على شكل راسب صلب. ونظراً إلى صلابتة، فانه لا يبدى أي تاثير كيميائي حيوى ويمكن إبعادة من الجسم بكمية بسيطة من الماء.

وتركيبياً، يتكون الجهاز الاخراجي في الحشرات من أنابيب ملبيجى (Malpighian tubules) موجودة في فراغ الجسم حيث تكون مغمورة بالدم (الشكل ٥٢-٢). ولو أنه لا يوجد إنفتاح مباشر إلى الدم، تأخذ خلايا تلك الأنابيب المواد من الدم وتمررها في فراغ تلك الأنابيب، ثم يعاد إمتصاص المواد النافعة، بما فيها الماء. وعند إنخفاض



الشكل ٢٥-٢. الفضلات الأخراجية (أساسا حمض اليوريك) في النطاط تلقى في الأمعاء، حيث تمتص ثانية أغلبية الرطوبة الموجودة في تلك الفضلات. ويمكن للنطاط بذلك أن يخرج فضلات تمثيله الغذائي بدون فقد ماء تقريبا.

تركيز الماء بداخل الأنبوبة، يترسب حمض اليوريك. وبدلا من أن تفتح مباشرة إلى الخارج، فان تلك الأنابيب تؤدي إلى الامعاء، حيث يمتص ماء أكثر. ويمر حمض اليوريك بعدئذ إلى الخارج مع البراز، يكون هذا الافراز الأخير جافاً، بذلك يمكن للنطاط أن يتخلص من فضلاته النيتروجينية بدون فقد الماء المهم في العملية الاخراجية.

الاخراج في الانسان EXCRETION IN HUMAN

أهم أعضاء الاخراج في الفقاريات هي الكلية، ولأن الكثير معروف عن وظيفة الكلية في الثدييات عن أي نوع آخر، فسنتولي أولا فحصها، مستخدمين أنفسنا كمثال على ذلك. وسنتولي فيها بعد الكشف عن بعض التحورات التركيبية والوظيفية الموجودة في كلى فقاريات أخرى.

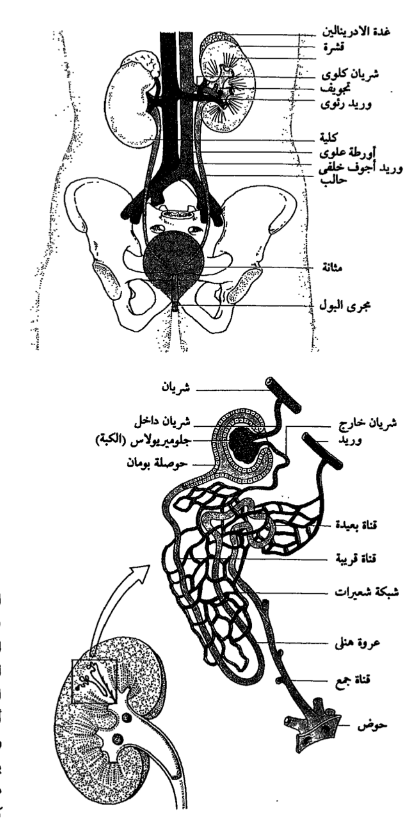
٢٥-٤ . تركيب كلية الانسان: STRUCTURE OF THE HUMAN KIDNEY

كلى الانسان عبارة عن عضوين شكلهما كحبة الفاصوليا (Bean-shaped) وكل كلية في حجم قبضة اليد المقفلة، توجدان ملاصقتان للجدار العلوي للجسم على جانبي العمود الفقرى.

ولو أن الوزن الكلى للكليتين يعادل نحو ٥٪ فقط من وزن الجسم الكلى فان الكليتين تستلمان مدداً غنياً فوق العادة من الدم، إذ أن ٢٠-٢٥٪ من الدم الذي يضخة القلب كل دقيقة يصب فيهما. ويصل هذا الدم إلى الكليتين عن طريق شريان كلوى أيمن وآخر أيسر، ويخرج هذا الدم من الكليتين عن طريق الوريدين الأيمن والأيسر (الشكل ٢٥-٣).

ويوضح القطاع العرضي في الكلية بأنها تتكون من ثلاث مناطق واضحة. المنطقة الخارجية وهي القشرة (Cortex) وتحتها المنطقة التالية وتسمى النخاع (Medulla) ويدخل النخاع غرفة مجوفة هي حوض الكلية (Pelvis).

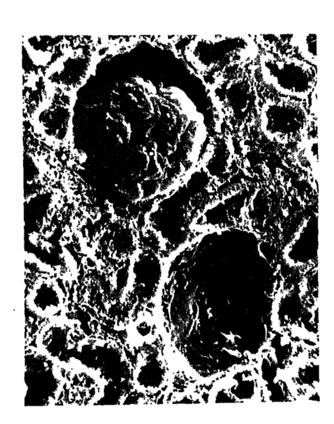
و تتكون القشرة والنخاع لكل كلية من نحو مليون نفرون (Nephrones) ، والنفرون هو الوحدة التركيبية والوظيفية للكلية. ولتفهم فسيولوجية الكلية ككل نحتاج فقط



الشكل ٢٥-٣. الجهاز الأخراجي في الأنسان. أعلى: التشريح العام. أسفل: نفرون واحد (مكبر). يوجد تقريبا نحو مليون نفرون في كل كلية.

لمعرفة فسيولوجية نفرون واحد فقط.

ويتكـون النفـرون من أنبـوبة ملفوفة طويلة (عدة سنتيمترات) مقفولة عند أحد أطـرافهـا ومفتـوحة عند الطرف الآخر (الشكل ٢٥-٣). وعند النهاية المغلقة لكل أنبوبة، في القشرة، يتمدد جدار النفرون وينثنى على شكل غرفة مزدوجة الجدران، والمسمـاه كبسولة (او محفظة) بومان (Bowman's capsule) (الشكل ٢٥-٤)، وبداخل الجزء المنثنى من كبسولة بومان توجد شبكة من الشعيرات، المسماه كبه (glomerulus) وتتكون الأنبوبة نفسها من ثلاث حلقات محددة. الحلقة الاولى، هي الانبوبـة القريبة (Proximal Tube) ملفوفة (ملتوية كثيرا) قرب كبسولة بومان، وخلايا جدر هذه الحلقة من الأنبوبة مزودة بكثرة بالميتوكوندريا، كما يمتد كثير من الخمائل (Microvilli) من تلك الخلايا إلى داخل (قناة) الأنبوبة. وتؤدى الأنبوبة القريبة إلى الحلقة الثانية وهي طويلة ذات جدر رقيقة وتسمى عروة (أو أنشوطة) هنلى (Loop of Henle) ويسيـر هذا الجـزء لأسفـل في النخـاع ، وتعمـل إنثنـاء يشبـه دبـوس الشعـر (Hairpin) ثم يعـود إلى منطقة كبسولة بومان، وهنا تتمدد الأنبوبة ثانية مكونة الحلقة الثالثة أو الأنبوبة البعيدة (الطرفية) (Distal Tubule) ، وكما في الأنبوبة القريبة فإن الأنبوبة البعيدة كثيرة الالتواء.



الشكل ٢٥-٤. قطاع في قشرة كلية فـأر كمـا يـرى تحـت الميكروسكوب الالكتروني المسّاح. قرب القمـة، المركـز، يمكن رؤية كبسولة بومان بمجـاميع شعيراتها الدموية. وتحتها مبـاشرة توجد حوصلة بومان أخرى منـزوعـة. وتـوضـح باقى الصـورة قنوات الأنابيب البعيدة والقريبة كما هي مقطوعة بزوايا مختلفة (بتصريح من كيث ر. بورتر).

٢٥-٥ . تكوين اليوريا: THE FORMATION OF URINE

يصنع النفرون البول، ويعمل ذلك بترشيح الدم ثم إعادة المواد النافعة ثانية إلى الدم، ويترك ذلك المواد الغير نافعة للمرور إلى خارج النفرون في محلول والذي نسمية البول.

وتستلم شبكة الشعيرات في الكلية الدم من شريان وارد Afferent وتفرغ دمها في شريان صادر Efferent والـدم داخل الشبكة، مثل الدم الموجود عند النهاية الطرفية لشعيرة دموية شريانية، يكون تحت ضغط بسبب إنقباض البطين الأيسر. ويسبب هذا الضغط رشح الماء والجزيئات الصغيرة الموجودة في الدم (وبذلك نتفادي البروتين) خلال جدر الشعيرات. ويسمى السائل الناتج بالرشح النفروني (Nephric Filtrate)، ونظره إلى الشكل (٢٥-٥) توضح أن هذا السائل المترشح ما هو إلا ببساطة بلازما دم تنقصها كل بروتينات الدم. لذلك لا يختلف هذا السائل عن السائل البين فراغي (Interstilial Fluid) (انظر قسم ٢٣-١٦).

الشكل ٢٥-٥. تركيب البلازما، الراشح النفروني، البول (جرام / ١٠٠ ملليلتر من السائل)، هذه قيم ممثلة. وقيم الاملاح على الخصوص متباينة حسب كمية الملح والماء المأخوذة.

المكون	البلازما	الراشح النفروني	البول	التركيز	العائد ٪
اليوريا	٠,٠٣	٠,٠٣	١,٨	٦٠×	٥٠٪
حمض اليوريك	٠,٠٠٤	٠,٠٠٤	٠,٠٥	١٢×	٩١٪
الجلوكوز	٠,١٠	٠,١٠	لاشيء	---	١٠٠٪
الأحماض الأمينية	٠,٠٥	٠,٠٥	لاشيء	---	١٠٠٪
الأملاح الكلية الغيرعضوية	٠,٩	٠,٩	٠,٩-٣,٦	١٢-٤×	< ٩٩,٣٪
البروتينات و الغرويات الأخرى	٨,٠	لاشيء	لاشيء	----	----

ويتجمع الراشح النفروني بداخل كبسولة بومان ثم يمر إلى الأنبوبة القريبة، وهنا يمتص ثانية الجلوكـوز، الأحماض الأمينية وكميات كبيرة من الأيونات الغير عضوية

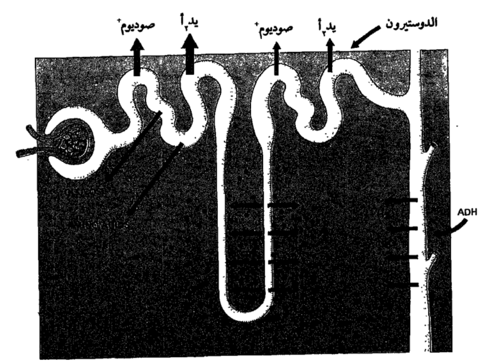
$SO_4, PO_4 \quad , HCO_3, Cl^-, Ca^{++}, K^+ , Na$)

(الشكـل ٢٥-٦). وتستمـر عملية إعـادة الامتصـاص هذه بالنقـل النشط. وكل التفاصيل الخاصة بمعرفة كيف يتم ذلك غير معروفة حتـى الآن، لكن تحتـاج تلك العمليـة إلى إنـزيمات و ATP. وكـما ذكـر أعـلاه، فان خلايا الأنبـوبـة القريبة غنية بمحتوياتها من الميتوكوندريا، يعادل معدل تمثيلها الغذائي مثيلة في أي خلية أخرى بالجسم، بما فيها الخلايا العضلية النشطة. وعلاوة على ذلك، فان خمائلها تزيد بكثر مساحة السطح المعرض للراشح النفروني. والشكر الكثير إلى الخمائل، إذ أن المساحة السطحية التي تساهم في تكوين البول في الانسان تساوي ستة أمتار مربعة، أو ثلاثة أضعاف مساحة سطح الجسم من الخارج.

وترجـع المواد التي يعـاد إمتصاصها بواسطة الأنبوبـة القريبـة إلى الـدم من نهايـات الشعيرات التي تحيـط بالأنابيـب. وفي الثدييـات، تتسلـم نهايـة تلك الشعيرات كل إمدادتهـا من الـدم من الشريـان الصادر أى الخـارج (Efferent) لشبكة الشعيرات في الكبة (glomerulus) وتصفى نهايات الشعيرات الدموية ما بها في أوردة تصب في النهاية في الوريد الكلوى.

إلى أن يتم إبعاد المحاليل المختلفة من الراشح النفروني وإعادتها إلى الدم، حتى تتبعهـا كمية كبـيرة من الماء. وإعادة إمتصاص الماء يرجع كلية إلى العملية السلبية الأسموزية. وانتقال السوائل من الراشح النفروني إلى الدم يزيد من تركيز الماء في هذا الراشح النفروي ويمر الماء بعد ذلك بالعملية الأسموزية إلى الدم ليحافظ على التوازن الأسموزي.

ولـو أن كمية الراشح النفروني الناتجة بواسطة نفرون واحد ليست كبيرة، إلا أن الكمية الناتجة عن مليونين من النفرونات تكون كبيرة جداً، فينتج نحو ١٨٠ لتر من الراشح النفروني كل يوم في الكليتين، وتمثل هذه الكمية من السائل أكثر من ضعف وزن الفرد. وعلى أ ية حال، فان ٨٠ - ٨٥٪ من الماء في الراشح النفروني تمتص ثانية بالأنابيب القريبة ويمتص مع هذا الماء أكثر من كيلو جرام من كلوريد الصوديوم



الشكل ٢٥-٦. نشاط الانتقال في النفرون. تنتقل أيونات الصوديوم، الجلوكوز، الأحماض الأمينية بنشاط خارج الأنابيب القريبة وثانية إلى الدم. ويتبع تلك المواد الذائبة دخول كميات كبيرة من الماء بالانتشار. وتنتقل كذلك بنشاط أيونات الصوديوم خارج السائل في عروة هنلى، وبكميات ينظمها مستوى هورمون الألدوستيرون، و خارج الأنابيب البعيدة كذلك. ويتسبب التركيز المرتفع لأيونات الصوديوم في السائل البين خلوى حول عروة هنلى في وجود ضغط أسموزي مرتفع يسحب الماء من أنابيب التجميع. ونفاذية جدر أنابيب التجميع (وكذلك الأنابيب البعيدة) وبالتالي كمية الماء التي تنتشر إلى خارجها تنظم بواسطة الـ (ADH)

(NaCl) - ٤٠٠ جرام من $NaHCO_3$ (وهي تعادل تقريبا محتويات صندوق وزنه رطل من صودا الخبز التجارية)، ١٨٠ جرام من الجلوكوز، كميات أقل من مواد أخرى نافعة. ومن السهل رؤية أن الحياة لا يمكن أن تدوم لمدة طويلة إذا خرجت تلك الكميات ببساطة من الجسم.

ولا تسترد الأنبوبة القريبة كل المواد الذائبة في الراشح النفروني إذ أن نحو ٥٠٪ من الفضلات النيتروجينية، اليوريا، تبقى، كما تبقى كذلك كميات لا بأس بها من الأملاح الذائبة في السائل الموجود داخل الأنبوبة.

و بمرور هذا السائل في عروة هنلى (Loop of Henle) يكون متعادل التوتر تقريبا

(Isotonic) مع الدم. وتمتص السوائل والماء بنسب متساوية في الأنبوبة القريبة. ويتغير هذا الوضع كثيرا بمرور السائل في عروة (أو أنشوطة) هنلي والأنبوبة البعيدة. وهنا ينقل صوديوم أكثر بنشاط من السائل (شكل٢٥-٦). وبما أن جدر عروة هنلي غير نفاذه لمرور الماء لذلك لا يتبع الماء أيونات الصوديوم بالخاصية الأسموزية. ونتيجة لذلك، فان السائل البيني في نخاع الكلية يصبح شديد الملوحة. وبفقدة الملح وليس الماء فان السائل الذي يتبقى داخل عروة هنلي يصبح في الحقيقة أقل توتراً (Hypotonic) من الدم عندما يصل الى الأنبوبة البعيدة.

ويمكن أن تتغير جدر الأنابيب البعيدة وكذلك قنوات التجمع (Collecting) في نفاذيتها للماء. ففي الأنبوبة البعيدة، تضخ كمية إضافية من الصوديوم للخارج بخاصية النقل النشط. واذا ما احتاج الجسم الى الاحتفاظ بكمية أكبر من الماء لتجنب الجفاف، فان الجدر تصبح أكثر نفاذية للماء ويتبع الماء الصوديوم بالضغط الاسموزي. وتمر قناة التجمع خلال النخاع الشديد الملوحة وزائد التوتر (Hypertonic) وبذلك، عندما تصبح جدر قناة التجمع أكثر نفاذية للماء، يمر الماء للخارج بالخاصة الأسموزية الى السائل البين خلوى للنخاع (الشكل ٢٥-٦). وعندما يعمل الجهاز للحفاظ على أكبر كمية من الماء، فقد يبقى نحو نصف لتر/يوم من اليوريا وذلك من الكمية الكلية البالغة ١٨٠ لتر/يوم للراشح النفروني. وشكرا للسائل البين خلوى زائد التوتر لنخاع الكلية، إذ أن تركيز المواد الذائبة البول يمكن أن يعادل أربعة أضعاف التركيز الموجود في الدم.

ولو أن تكوين البول في الثدييات يحدث أوليا بميكانيكية الترشيح وإعادة الامتصاص التي وصفت من قبل إلا أنه توجد ميكانيكية أخرى تتدخل في الأمر وهذه هي الافراز الأنبوبي. فتبعد خلايا الأنابيب بعض المواد من الدم في الشعيرات المحيطة، ثم تفرز تلك المواد في السائل الموجود داخل الأنابيب وبذلك يضاف الى البول. وهناك مادتان تفرزان بتلك الطريقة هما أيونات الايدروجين (H^+) وايونات البوتاسيوم (K^+) وفي كل حالة، فان إفراز هذه المواد (والتي توجد في الأنابيب البعيدة)، يصحبه إعادة امتصاص أيون - الصوديوم. ويعتبر إفراز الايدروجين (H^+) هاما في مساعدة الحفاظ على ثبات درجة الحموضة (pH) في الدم. عند إبتداء حموضة الدم في الانخفاض، تفرز أيونات الايدروجين الزائدة في الأنابيب. وفي الحالات النادرة،

عندما يصبح الدم شديد القلوية، تقلل الأنابيب من إفرازها للايدروجين لحين إعادة درجة حموضة الدم الى حالتها الطبيعية. وبالمساعدة على الحفاظ على درجة حموضة الدم في الحدود الطبيعية وهي ٧,٣ - ٧,٤، يمكن للخلية إنتاج بول له درجة حموضة قليلة (٤,٥) او مرتفعة (٨,٥).

ويلعب إفراز الأنابيب كذلك دورا في إستبعاد بعض الفضلات النيتروجينية الخاصة، مثل ن يد٤ (NH^3) والكرياتينين (Creatinine) ولكن حتى بدون الافراز الأنبوبى، يمكن للكلية أن تتعامل بسهولة مع إستبعاد تلك المواد. والشيء الغريب، أن الافراز الأنبوبى يلعب دورا رئيسيا في إستبعاد بعض المكونات الغير عادية والتي قد تدخل الجسم، مثل صبغة الفينول الحمراء. ويبدو رائعا أن خلايا أنابيبنا تمتلك الآلة الانزيمية الخاصة بالنقل النشط للمواد التي تعرض لها نوعنا البشري حديثا فقط.

٢٥-٦. تحكم الكلية CONTROL OF THE KIDNEY

يعاد إمتصاص أغلب الماء المترشح عند تجمعات شعيرات الكلية (٨٠-٨٥٪ منه) إجباريا في الأنابيب القريبة، كما يعاد إمتصاص كميات مختلفة من الماء المتبقى في الأنابيب البعيدة وقنوات التجمع طبقا للاحتياجات المائية للجسم. وينظم إعادة الامتصاص الاختياري (Selective) للماء هورمون يعمل على زيادة إعادة الامتصاص للماء وبالتالي يقلل من حجم البول الناتج. وبسبب عمله هذا، يطلق على هذا الهرمون إسم المضاد للافراز اليوريني (Antidiuretic hor- diuresis) mone = الإفراز الزائد للبول) (ويعرف كذلك باسم فاسوبريسين (Vasopressin والهرمون (ADH) عديد الببتيدات (Polypeptide) ويحتوي على (٩) أحماض أمينية.

ويفرز هرمون ADH من الغدة النخامية (Pituitary gland) وهي غدة صغيرة جدا موجودة عند قاعدة المخ. ويتحكم في إفراز هرمون ADH تركيز الماء في الدم. وأي مسبب يتسبب في جفاف الجسم، مثل العرق الشديد، يسبب هبوطا في تركيز الماء في الدم، وتكتشف ذلك مستقبلات (Receptors) في المخ تنبه بدورها الغدة النخامية لافراز هرمون (ADH) الذي يحمل بدوره بواسطة الدم إلى الكلية. وفي الكلية يزيد هذا الهرمون من نفاذية جدر الأنابيب البعيدة وقنوات التجميع للماء. ويترك الكثير من الماء

بالضغط الأسموزي ويرجع إلى الدم، وهذا يتسبب في إبقاء المستوي العادي للماء في الدم، كما يؤدي ذلك أيضا إلى انتاج كمية شحيحة ولكن مركزة من البول. وعند الافراز الغزير للهرمون (ADH) قد يصبح تركيز المواد الذائبة في البول أربعة أضعاف تلك الموجودة في الدم. ونحن نتقاسم تلك القدرة في إنتاج بول زائد التركيز (Hypertonic) مع الثدييات الأخرى ومع الطيور، ولاتستطيع فقاريات أخرى عمل ذلك (إذ لا تمتلك تلك الفقاريات الأخرى عروة هنلى التي تجعل ذلك ممكنا).

وإذا ما بدأ الدم في أن يصبح مخففا جدا (كما يحدث بعد شرب كمية من الماء)، يمتنع إفراز هرمون (ADH) وتعيد الأنابيب البعيدة وقنوات التجميع ماء أقل إلى الدم كما تنتج كمية كبيرة من البول المائي. وقد يكون تركيز المواد الذائبة في هذا البول نحو ربع تركيزها في الدم.

ومن وقت لآخر، يفقد الناس قدرتهم على إفراز هرمون (ADH) ويكونون فريسة لمرض السكرى (Diabetes insipidus).وأهم الأعراض الدراماتيكية لهذا المرض هو إنتاج بول مائي بكميات كبيرة، مصحوبا ذلك بالعطش الشديد، وقد يتبول المصابون نحو ٢٠ لترا كل يوم (١٠-٢٠ ضعف متوسط الكمية). ولتفادي الجفاف المميت يجب على مرضي البول السكرى أن يعوضوا هذا الفقد من الماء بشربهم المياه العذبة.

وتكون إعادة امتصاص أيونات الصوديوم وأيونات الكالسيوم بواسطة الأنابيب أيضاً تحت التحكم الهرموني، وستتم دراسة تفاصيل عمل الهرمونين المسئولين عن ذلك في الباب السابع والعشرين.

ويجب أن توضح دراستنا عن فسيولوجية الأنابيب أن الكلية هي أكثر من مجرد عضو إخراجي. فبكل تاكيد فهي تبعد الفضلات النيتروجينية وغيرها، وتبعد أيضا المواد الغريبة من الدم وكذلك المحتويات العادية في البلازما، والموجودة في الدم بكميات أكثر من التركيز المعتاد. وعند وجود كمية زائدة من الماء، أيونات الصوديوم، أيونات الكلوريد، غيرها، تمر هذه الزيادة بسرعة إلى الخارج في البول. ومن جهة أخرى، فان الكلية تعمل على تعويض نفس المواد إذا ما تواجدت في الدم بكميات تقل عن التركيز العادي. وبهذه الطريقة، فان الكليتين تنظمان باستمرار التركيب الكيميائي للدم في أجسامنا وذلك في حدود ضيقة. وتزول المنتجات الاخراجية ببساطة لأنها تميل

طبيعيا الـى التجمع فـي مستويات زائدة. والحفاظ على تركيب ثابت للدم يؤكد بدورة وجـود سائـل بين فراغي (Interstitial) ثابت. وبـاختصار، فان الكلية هي من أهم الأعضاء في جسمنا التي تحافظ على تركيب ثابت للبيئة الداخلية، كما أنها واحدة من أهم أجهزة توازن وظائف سوائل الجسم.

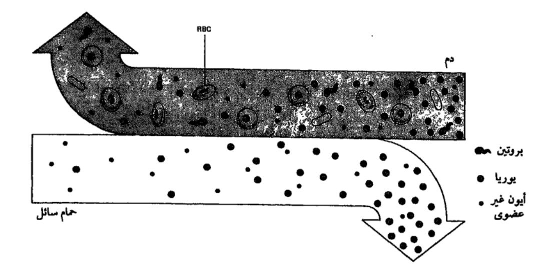
٢٥-٧. ميكانيكية الاستبعاد MECHANICS OF ELIMINATION

تستمر عملية تكوين البول بدون إنقطاع، وتصفى كل قناة تجمع البول من العديد من النفرونات إلى حوض الكلية (الشكل ٢٥-٣). ويتدفق البول من الكلية إلى المثانة بواسطة قناة هي الحالب (Ureter).والمثانة (Bladder) عضو عضلى مجوف تتمدد عندما يصب فيها البول من الكليتين. وعند امتلاء المثانة بالبول، يرتخى القابض (Sphincter) العضلى الذي يحرس مخرجها كي يخرج البول إلى الخارج عن طريق القناة البولية (Urethra).

ويدخل الحالبان المثانة بطريقة تجعل فتحتيهما (من جهة المثانة) يجبران على القفل عندما يبدأ الضغط في المثانة. واذا ما تأخر تكوين البول لفترة من الوقت، يبدأ البول في التجمع في الحالبين وحتى في حوضى الكليتين. وأخيرا عند خلو المثانة، يسمح لهذا التجمـع أن ينسـاب لاسفل، بذلك يجد الفرد ان التأخير الطويل في التبول، يتبعه بسرعة الحاجة إلى تبول ثان.

٢٥-٨. مرض الكلية KIDNEY DISEASE

وكـما يتوقع المرء من الأهمية الخاصة والقاطعة للوظيفة التي تؤديها الكليتان، فأي تدخل طويل الأمد في وظائفهما يكون له عواقب وخيمة. ولسوء الحظ، يوجد عدد من الأمراض والتي يكون نتيجتها تقليل أو حتى توقف الكلية عن العمل. فقد تتسبب الصدمة من جراء اصابة بالغة، أو زيادة في فقد الدم، وبعض السموم، والساعات التي تعقب بعض الأمراض المعدية في حدوث فترة من الفشل الكلوى الحاد. فإذا ما إستطاع الضحية أن يتخطى هذه الفترة من توقف عمل الكليتين - مع ما يصحب ذلك من بناء فضلات سامة - قد تبدأ الكليتان في العمل ثانية كما كانت في السابق. ومن جهة أخرى، يوجد عدد من أمراض تدهور الكلية التي تؤدى إلى الفقدان التدريجي



الشكل ٢٥-٧. الإنتشار الغذائي (Dialysis) في الكلية الصناعية. الجزيئات الصغيرة، مثل اليوريا، الأملاح تكون حرة الانتشار بين الدم وحمام السائل حيث تبقى الجزيئات الكبيرة والخلايا مرتبطة بالدم. ولابد من أن يكون حمام السائل يحتوي على الأملاح الرئيسية التي تضاف الية لمنع الفقد الخطير لتلك الأملاح من الدم. ويضاف الى الدم مادة ضد التجلط حتى لا يتجمد (يتجلط) أثناء مروره داخل الماكنة.

لوظيفة الكلية بدون عودة.

ويوجد سلاح واحد ضد هذه الامراض التي تهدد الحياة وهو اختراع الكلى الصناعية والتي تعمل على أساس الإنتشار الغشائي (Dialysis) (الشكل ٢٥-٧). وكما رأينا في قسم (٦-٣)، يوجد غشاء شبه منفذ، مثل لوح من السيلوفان، يفصل، مابين سائلين ويسمح للجزيئات الصغيرة والأيونات بالمرور خلالة ولكنه يمنع مرور الجزيئات الكبيرة مثل البروتينات. وتمرر آلة الكلية الصناعية (الشكل ٢٥-٨) ببساطة الدم (المعامل بالهيبارين – Heparin – و هي مادة مانعة للتجلط) عبر جهة واحدة من غشاء السيلوفان وحمام سائل مجهز جيدا عبر الجهة الاخرى. ولا يكون السائل، بطبيعة الحال، ببساطة من الماء، لأن هذا يؤدى إلى الفقد السريع لجميع الجزيئات الصغيرة والأيونات من الدم. وعلى أية حال، بتجهيز حمام سائل ذو تكوين خاص، فيمكن إبعاد أي ايون معين أو جزيء من (أو اضافة إلى) الدم، كما هو مناسب. وفي الحقيقة، فان كفاءة التبادل كبيرة جدا لدرجة أنه في حالة عدم وجود يوريا في الحمام المائي الابتدائي، فان الالة تبعد اليوريا من الدم أسرع مما تستطيعة الكليتان الحقيقيتان.

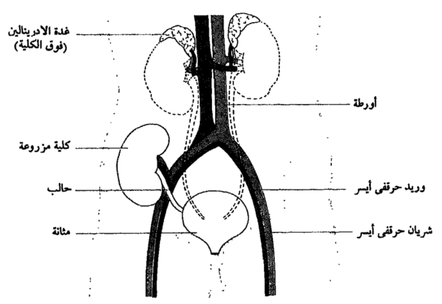


الشكل ٢٥-٨. الكلية الصناعية.يسحب الدم من شريان (الأنبوبة العلوية)، ويمر خلال مصيدة فقاعية، ويدخل الكلية الصناعية عند القمة. ويدخل مدد دائم من سائل حمامى طازج (صافي) من الماكينة (الى اليسار من أسفل)، ويمر فوق أغشية الإنتشار ويترك (أعلى اليمين) للتخلص منه. ويترك الدم المنقى الكلية الصناعية (أسفل)، ويمر في مصيدة فقاعية ثانية، ويرجع الى وريد في الذراع (الأنبوبة السفلى). (الصورة بتصريح من مؤسسة كوردس).

أثبتت الكلى الصناعية كفاءة مذهلة في مساعدة الضحايا المصابين بفشل كلوى حاد في تخطى المأساة إلى أن تبدأ كليتا الضحايا أنفسهم في العمل ثانية. كما أن الكليتين الصناعيتين مكنتا الكثير من الذين يقاسون من حالات مزمنة كي يظلوا أحياء، ولو على حساب كبير من الوقت (غالبا ثلاث جلسات Sessions وكل جلسة مدتها ٦ ساعات أو أكثر أسبوعيا) والتكلفة، والقدرة الفسيولوجية.

و البديل الذي يرجى منه عن الإنتشار الغشائي الطويل المدى للفشل الكلوى الحاد هو زراعة كلية جديدة. والعملية بسيطة تكنيكيا، إذ توضع كلية المتبرع منخفضة في فراغ البطن ويوصل شريانها ووريدها إلى شريان ووريد حرقفى، على التوالي،ويمكن ايصال الحالب بسهولة إلى المثانة (الشكل ٢٥-٩).

والمشكلة الرئيسية لزراعات الكلية هي مشكلة الرفض المناعى، فاذا لم يكن للمريض توأم مماثل له كمتبرع، فان جهازة المناعى يتعرف على الكلية المنزرعة كجسم



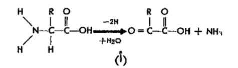
الشكل ٢٥-٩. طريقة زرع الكلية. تبعد كلية المستلم (المريض) في العادة، تربط الشرايين والأوردة الكلوية (فيما عدا الفروع التي تغذى غدد الأدرينالين - غدد فوق الكلية - والتي يتم تركها ملتصقة)

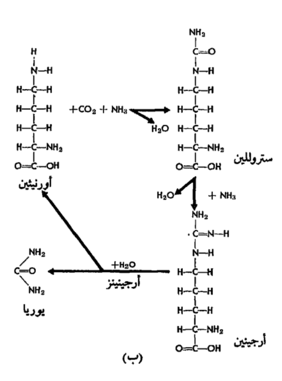
غريب ويبدأ في تدميرها. وعلى أية حال، فقد وجدت عقاقير متنوعة فعالة في إحباط ميكانيكية مناعة الجسم. وبالاستخدام الحذر لتلك العقاقير، يبقى الكثير من الكلى المنزرعة عاملة لمدد تبلغ عدة سنوات. وبخصوص الزرع بين التوائم المتماثلة، فلا حاجة إلى العقاقير المثبطة للمناعة، إذ يمكن للكلية الجديدة البقاء مدى الحياة (٢٥ سنة هو الرقم القياسي عند كتابة هذا المؤلف)، إلا إذا تقدم المرض الذي يدمر كلية الضحية ويدمر الكلية الجديدة.

٢٥-٩. الفضلات النيتروجينية للانسان

THE NITROGENOUS WASTES OF HUMANS

إن الفضلات الأساسية النيتروجينية في الانسان (كما في جميع الثدييات) هي اليوريا، التي تصنع في الكبد. وتنشأ أغلب الفضلات النيتروجينية في الجسم من تكسير الأحماض الأمينية، يحدث هذا التكسير الأميني Deamination كذلك في الكبد. وينتج عن التكسير الأميني تجمع الأمونيا (الشكل ٢٥-١٠) وهي مادة سامة جدا وتجمعها في الجسم معناه الموت السريع. وعلى أية حال، تحتوي الكبد على جهاز





شكل ٢٥-١٠. (أ) التكسير الأميني، (ب) تخليق اليوريا. وينتج فعل أنزيم الأرجينيز جزيئا من اليوريا ويتجدد الأورنيثين للدخول في الدورة مرة أخرى.

من جزيئات حاملة وانزيمات تحول الأمونيا (وثاني اكسيد الكربون) بسرعة إلى يوريا. وكلما تم تخليق جزيء من اليوريا فان الجزيء الحامل، الأورنيثين Ornithine ، يتجدد كي يعاد إستخدامة. ولا يمكن لأجسامنا تحمل تركيزات مرتفعة من اليوريا، مع أنها أقل سمية بكثير من الأمونيا. وكما رأينا، تبعد الكلية اليوريا بكفاءة من الجسم.

ومن العجب وجود كميات صغيرة من حمض اليوريك في البول. وحمض اليوريك هو مادة الفضلات النيتروجينية الرئيسية في الحشرات والسحالي والثعابين والطيور. ومن بين جميع الثدييات، على اية حال، فالانسان فقط، القردة العليا والكلب الدالماتياني (Dalmatian) هي التي تفرز حمض اليوريك. وينشأ حمض اليوريك في الانسان من تكسير الأحماض النووية وليس من البروتينات. والثدييات الأخرى تنتج حمض اليوريك بتكسر الأحماض النووية، ولكن يوجد بها أيضا إنزيم يحلل حمض اليوريك بعد ذلك. وكما ذكر سابقا، فان حمض اليوريك غير قابل للذوبان. وفي بعض الأفراد، قد يكون تركيز حمض اليوريك مرتفعا بحيث أنه يبدأ في الترسيب خارج

المحلول. وتتراكم بللورات إبرية من حمض اليوريك في المفاصل، مسببة الآما حادة نتيجة الاصابة بمرض يسمى النقرس او داء الملوك. (Gout).

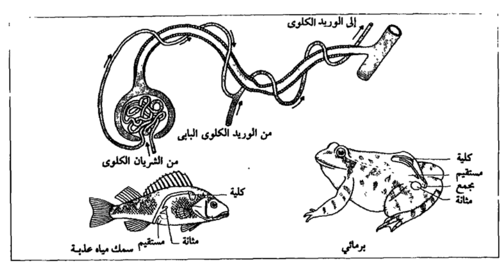
الاخراج في الفقاريات الاخرى EXCRETION IN OTHER VERTEBRATES

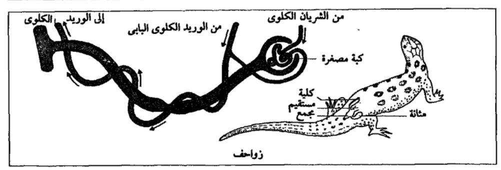
توجد الكلى في جميع الفقاريات. ومثل كلية الانسان، فهي مكونة من مجاميع من النفرونات. وتوجد، على أية حال، بعض الاختلافات في تركيب ووظيفة النفرونات في كلى الفقاريات المختلفة (غير الانسان). ويمكن إرجاع تلك الاختلافات إلى البيئة التي تعيش فيها تلك الحيوانات.

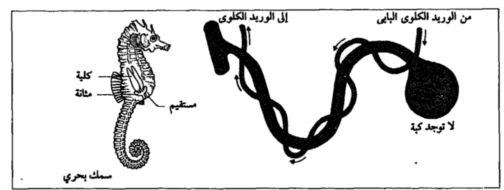
٢٥-١٠. الفقاريات المائية AQUATIC VERTEBRATES

تعاني أسماك المياة العذبة، مثل جميع حيوانات المياة العذبة، من التدفق المستمر للماء من البيئة الأقل قوة (Hypotonic) وحراشيف الأسماك غير منفذة للماء، ولكن أغشية الخياشيم الرقيقة تسهل دخول الماء إلى الجسم. ولتجنب التخفيف الشديد للسوائل بالجسم، لابد لسمكة المياة العذبة أن تفرز هذا الماء الزائد، يمكنها عمل ذلك بنفس الميكانيكية الموجودة في الأميبا: أي إستخدام الطاقة لإرجاع الماء ثانية إلى البيئة. وفي الأسماك، يقوم (ATP) بإمداد الطاقة اللازمة لإنقباض القلب، ويزودنا إنقباض القلب بالضغط اللازم لدفع الدم إلى الخارج من الكبة (glomerulus) الموجودة في حوصلة بومان. وبالطبع تمر أيضا أملاح قيمة (مثل الأملاح، الجلوكوز) بداخل المرشح النفروني،وهذه يجب الاحتفاظ بها بواسطة الأنابيب في الكلية،وتمر في الدم في الشعيرات المحيطة بالأنابيب. ويأتي الدم اللازم لهذه الشعيرات من الكبة الموجودة في حوصلة بومان (كما في الإنسان) وكذلك من الأوردة التي تنزح (Drain) الدم من المنطقة الخلفية من جسم السمكة (الشكل ٢٥-١١). وهذا الجزء الخاص من تزويد الدم يسمى بالجهاز الكلوى البابي (Renal Portal System) (ماهو المثل الآخر الذي قمت بدراستة والخاص بوريد يؤدي إلى نهاية الشعيرات الدموية بدلا من العودة مباشرة إلى القلب؟).

وبعد إستكمال إعادة إمتصاص الأملاح، لاتكون اليوريا إلا أكثر من ماء وتترك أغلب الفضلات النيتروجينية (بما فيه كميات كبيرة من ن يد ٣ NH_3) في الواقع جسم السمكة بالإنتشار للخارج عن طريق الخياشيم. والكلية هي وسيلة للحفاظ على توازن مائي سليم في الحيوان، أكثر منها كعضو إخراجي.







الشكل ٢٥-١١ . مقارنة بين كلى الفقاريات. في كل حالة، يكون لتركيب النفرون علاقة بالدور الذي يلعبة في ابقاء محتوي مائي ثابت داخل الحيوان.

وتواجه الأسماك البحرية عكس المشكلة التي تواجهها أسماك المياة العذبة. فمحتويات ماء البحر من الأملاح مرتفعة جداً لدرجة، من الناحية الفسيولوجية، أن تعيش الأسماك البحرية في الواقع في بيئة جافة، وهي في خطر دائم من فقد ماء الجسم الحيوي إلى البيئة الأكثر قوة (Hypertonic).

وامكن للاسماك البحرية حل تلك المشكلة بطريقتين. فالأسماك الغضروفية مثل سمك القرش (Sharks) وأسماك (Skates) وكذلك الأسماك الشعاعية (Rays) تكونت عندهم مقاومة للمستويات المرتفعة الغير عادية من اليوريا في مجرى الدم بها. فقد يحتوي دم سمك القرش على ٢,٥٪ يوريا مقابل ٠,٠١-٠,٠٣٪ في دم الفقاريات الأخرى. وهذا المستوي من اليوريا مرتفع جداً بحيث يكون دم سمك القرش متعادل القوة (Isotonic) مع مياه البحر، ويعيش سمك القرش في توازن أسموزي مع بيئته وله كلية تعمل مثل كلية الإنسان (فيما عدا أن اليوريا التي يعاد إمتصاصها في أنابيب كلية سمك القرش تفوق بكثير تلك التي يعاد إمتصاصها في أنابيب كلية الإنسان).

وامكن للأسماك البحرية العظمية حل المشكلة بطريقة مختلفة (قسم ٦-٣)، فهي تفقد الماء بإستمرار ولكنها تستبدله بشربها مياة البحر وتقليل ملوحتة بسبب رجوع الملح إلى البحر بالنقل النشط عند الخياشيم. وتكون معيشة الأسماك العظمية في خطر دائم بسبب الجفاف من مياة البحر الزائدة الملوحة، ولا تجد سبيلا في ضخها لكميات كبيرة من الرشح التفروني عند الكبه. فكلما قلت كمية الماء التي توضع في الأنابيب، كلما قلت كمية الماء الواجب إعادة إمتصاصها. وليس من المستغرب أن الكثير من تلك الأسماك بها كبب (glomeruli) صغيرة جدا وضعيفة الأداء الوظيفي، بل وان البعض ليس به كبب بالمرة (الشكل ٢٥-١١).

و بالتخفيض في ميكانيكية إعادة إمتصاص - المواد المترشحة، فإن تلك الأسماك تعتمد أكثر على إفراز الأنابيب لإستبعاد الأملاح الغير مرغوب فيها. ويحتاج إفراز الأنابيب إلى مدد كبير من الدم إلى تلك الأنابيب. وبفقدان تلك الكبب، فلابد من أن يقوم الجهاز الكلوى البابى بالجزء الأكبر من الحمل.

٢٥-١١. الفقاريات الارضية TERRESTRIAL VERTEBRATES

تعمل كلية البرمائيات (Amphibians) مثل كلية سمك المياة العذبة، أساسا لميكانيكية إخراج الماء الزائد. ويزود الجلد النفاذ للضفدعة مكاناً سهلاً للمياه المحيطة بالدخول عن طريق الضغط الأسموزي. وكما يقترح إسم البرمائيات، على أية حال،

فقد تقضى هذه الحيوانات بعض الوقت على الأرض وتصبح المشكلة عندئذ هو حفظ الماء، وليس إستبعادة. وتنظم الضفدعة نفسها على المحتويات المائية المختلفة لبيئتها بتنظيمها معدل الترشيح عند الكبة. ويوجد جهاز كلوى بابى لحمل المواد المعاد إمتصاصها بالأنابيب بعيداً أثناء تلك الفترات عندما يكون تدفق الدم محدوداً في الكبة (الشكل ٢٥-١١). وعلاوة على ذلك، تستطيع الضفدعة إستخدام مثانتها البولية كجهاز لحفظ الماء، فعند وجودها في الماء، تمتلىء المثانة بسرعة ببوريا مائية سميكة، وعلى الأرض يمتص هذا الماء ثانية في الدم، بذلك يعوض فقد الماء الذي تم بالبخر عن طريق الجلد. وتكون ميكانيكية إعادة الإمتصاص تحت تحكم هرموني مشابه لهرمون (ADH).

ويعيش كثير من الزواحف (Reptiles) مثل ثعابين الصحراء ذات الأجراس (Rattlesnakes) في بيئات جافة جداً. ومن بين التحورات العديدة التي تمكنها من ذلك قدرتها على تحويل مركبات الفضلات النيتروجينية إلى حمض يوريك. و كما لاحظنا، فإن حمض اليوريك هذا غير قابل للذوبان، وعلى ذلك، يمكن إخراجة بدون إستخدام ماء كثير. وطبقا لذلك، فإن الكبب في تلك الثعابين تكون صغيرة نسبياً. وفي الحقيقة، فإنه ليس لبعض الزواحف كبب بالمرة أي أنها خالية من كبب،وتلك التي بها الكبب ترشح سائلا يكفى فقط لغسل حمض اليوريك الذي يفرز عن طريق الأنابيب في المجمع (Cloaca) (والمجمع عبارة عن غرفة يمر خلالها البراز والخلايا الجنسية وكذلك البول في طريقهم إلى الخارج. و يأتي الإسم من الكلمة اللاتينية للبالوعة - أو المجرور). وبداخل المجمع، يعاد إمتصاص أكثرية الماء وتفرغ الزواحف مجمعها دورياً، وبرازها ذو لون بنى،ويكون حمض اليوريك على هيئة عجينة بيضاء. و هذه الميكانيكية لحفظ الماء تجعل الزواحف قادرة على البقاء حتى وإن وجد أو لم يوجد ماء يمكن الحصول عليه. وتتضاعف كمية الماء الموجودة في غذاء الزواحف بالماء الناتج عن التنفس الخلوي وهو عادة يكفي إحتياجاتها.

ومن الأهمية ملاحظ أن قدرة هذه الزواحف على تحويل فضلاتها النيتروجينية إلى حمض اليوريك لهي ملاءمة للمعيشة على الأرض الجافة تماماً مثل ما يفعل جلدها الغير منفذ للماء وكذلك رئتاها، فاحدها ملاءمة فسيولوجية، و الأخرى تركيبية (مورفولوجية). ولكن لوحظ، أيضا، أنه يصاحب حمض اليوريك تغييرات تركيبية في

الكلية، إذ أن التركيب والوظيفة في الكائنات الحية مرتبطان كلية فلا يمكن أن نفهم التركيب التنظيمي للخلايا، الأنسجة، الأعضاء والأجهزة بدون تفهم كيفية عملها. ومن جهة أخرى، فالأنشطة الفسيولوجية للكائنات الحية يمكن القيام بها فقط بتراكيب منظمة تنظيما جيداً. والطالب الذي يقوم بدراسة كيفية عمل تلك المكونات التركيبية يأخذ لمحة سريعة على نصف قصة الحياة فقط، تماماً كما هو محدد في نظر الطالب الذي يقوم بدراسة الأنشطة الفسيولوجية بدون الاهتمام بالتركيبات التي تقوم بتلك الأنشطة.

وتحل الطيور (Birds) مشكلة الحياة على الأرض - الجافة بطريقة مماثلة لتلك الحلول التي حلت بها الزواحف والثعابين مشاكلها. فحمض اليوريك هو أيضا ناتج فضلاتها النيتروجينية، وهي المادة البيضاء التي يتركها الحمام فوق التماثيل.

ولـو أن الكبب في الطيور صغيرة جداً، فإنها تعمل بنشاط وتنتج كمية كبيرة من الراشح النفروني. ومن المحتمل وجود سببان لذلك، فالطيور (مثل الثدييات) ليس بها جهـاز كلوى بابى، لذلك فإن الدم اللازم لإعادة الإمتصاص في الأنابيب وكذلك الإفراز لابد أن يأتي من تلك الكبب. علاوة على ذلك، فالطيور (وثانية مثل الثدييات) لها ضغط دم مرتفع وبذلك لا يمكنها تفادي معدلات الترشيح المرتفعة التي تحدث في الكبب. وعلى أية حال، فالإنتاج الزائد من الراشح النفروني يكون أكثرعما يمكن تعـويضـه عن طرق الـزيادة في إمتصاص الماء في الأنابيب. وقد يصل تركيز حمض اليوريك في بول الـطيور نحو ٢١٪، ويزيد هذا التركيز عن ٣٠٠٠ مرة تركيز حمض اليوريك في الـدم. وإفـراز الأنابيب لحمض اليوريك هام جداً في هذه العملية من التركيز، لكن إعادة إمتصاص الماء في الأنابيب تعتبر عملية حيوية، كذلك.

ولـو أن الثدييات هي كذلك حيوانات أرضية، إلا أن المادة الرئيسية في فضلاتها النيتروجينية هي اليوريا. وتحتاج تلك المادة إلى كمية كبيرة من الماء لإستبعادها أكثر عما يحتاجه حمض اليوريك. وكما رأينا، تنتج الثدييات كميات كبيرة من الراشح النفروني ولكنهـا قادرة على إعـادة إمتصاص أغلبه في الأنابيب. وحتى مع إعادة الإمتصاص العضوى للماء في الأنابيب لابد للإنسان من أن يفرز عدة مئات من المليلترات يومياً حتى يمكنه دفع اليوريا إلى خارج الجسم.

ولبعض الثدييات كلى أكثر كفاءة من كليتنا نحن في هذا المجال، فإعادة الإمتصاص



الشكل ٢٥-١٢ . فأر الكانجارو (*Dipodomys spectabilis*) هذا الحيوان الثديي الصغير هيأ حياته جيدا للمعيشة في الصحراء ولا يحتاج للماء مطلقا.

في أنابيب فأر الكانجارو (الشكل ٢٥ - ١٢) ذات كفاءة عالية لدرجة أن هذا الفأر يمكنه إنتاج يورين Urine يعادل ١٧ مرة تركيز دمها. وأعلى يورين مركز جدا (Hyper-tonic) يمكننا أن ننتجه يعادل فقط في التركيز ٤ أضعاف تركيز الدم في أجسامنا. ويحتفظ فأر الكانجارو بالماء بالبقاء في حجوره أثناء حرارة اليوم، بذلك يقلل من فقد الماء عن طريق التبخير. وهذا المزج في الملاءمة السلوكية الفسيولوجية تجعل من غير الضروري لفأر الكانجارو أن يشرب الماء وتكفى الكمية البسيطة من الماء الموجوده في غذائه وكذلك الماء الناتج عن طريق التنفس الخلوى من سد إحتياجات هذا الحيوان الثديي.

ولقد كنا نشرح الكلى المختلفة الموجودة في فقاريات هذه الأيام، التي يعتقد أنها قد نشأت كلها خلال حقبة كبيرة من الزمن من أصل (Ancestor) واحد. ومن المحتمل أن تكون الأسماك قد نشأت في أواخر هذه الحقبة. وتمثل الثدييات والطيور تغيرا أكبر من الفقاريات الأولى (المبكرة). وكما نشأت الطوائف المختلفة من الفقاريات على الأرض، نشأت طرق جديدة من الحياة أيضا فعاشت البرمائيات على الأرض والطيور في الهواء. ويصبح من المستغرب ألا يعكس تطور عضو أهمية الكلية في تلك التغييرات. وفي هذا الباب تعرفنا على كيفية ملاءمة الكلى في الفقاريات المختلفة لطريقة حياة حيواناتها. وفي الباب الأربعين، سنبحث ثانية هذه الملاءمات كجزء من الصورة الأوسع للكثير من التغييرات التركيبية والوظيفية والتي وجدت أثناء تطور الطوائف المختلفة للفقاريات.

ملخص الباب CHAPTER SUMMARY

الاخراج هو إستبعاد المواد التي تتجمع بكميات تزيد عن حاجة الكائن. وتنشأ في الحيوانات مشكلات الاخراج الكبرى وهي الحاجة إلى إستبعاد (التخلص من) المركبات النيتروجينية. والأمونيا، وهي أول نواتج التحلل الغذائي للبروتينات، شديدة الذوبان وشديدة السمية. وتستخدم الحيوانات الأرضية مسارات الأيض لتحويل الأمونيا إلى أشكال أقل سمية، أو أقل ذوبانا مثل اليوريا (كما في البرمائيات والثدييات) وحمض اليوريك (في الحشرات والسحالي والثعابين والطيور).

والكلى هي أعضاء الاخراج الرئيسية في الفقاريات الأرضية. وتعمل الكلى أساسا باعادة الامتصاص الانتخابي (Selective). فكل الأيونات والجزيئات الصغيرة في الدم تصب أولا في النفرونات بالكلية كراشح خالي من البروتين من الدم يسمى بالراشح النفروني. وبمرور هذا السائل خلال أنابيب النفرونات، يحتفظ الجسم بتلك المواد التي يحتاجها (مثل الصوديوم Na^+ والماء يد$_2$أ) بالكميات المطلوبة تماما. وبخلاف الماء، تدخل هذه المواد ثانية إلى الدم بطريقة النقل النشط. وعلاوة على ذلك، فان بعض المواد (مثل الكالسيوم K والايدروجين H^+) تصب مباشرة في السائل الموجود بداخل الأنابيب وهي عملية تعرف باسم الافراز الأنبوبي والسائل الذي يتبقى بعد تجهيز محتويات الأنابيب هو البول Urine.

وإسترداد كل مادة من الراشح النفروني يكون منظما تنظيما دقيقا. فإعادة إمتصاص الماء، على سبيل المثال، يتحكم فيها المخ جزئياً والذي يعمل عن طريق هرمون (ADH) وهو هرمون تفرزه الغدة النخامية.

وعلاوة على وظائفها الاخراجية، فان كلى الفقاريات تلعب دورا رئيسيا في الحفاظ على التوازن المائي، بعملها هذا تمكن أصحاب هذه الكلى من المعيشة في بيئات مختلفة مثل المياة العذبة، المحيطات، الأراضى الجرداء.

تمارين ومسائل EXERCISES AND PROBLEMS

١ ـــ ما هي الفضلات الرئيسية النيتروجينية لكل من:

(أ) الثعبان ذو الاجراس (ب) الكلب،
(ج) الدجاجة، (د) سمكة القرش ؟

٢ ــ تتبع المسار الذي يعبرة جزيء يوريا من وقت دخولة الشريان الرئوي الى أن يترك الجسم؟

٣ ــ قارن بين السائل البين فراغي (Interstitial) والراشح النفروني من حيث :
(أ) التركيب ، (ب) طريقة التكوين.

٤ ــ في أي عضو يحدث تخليق اليوريا؟

٥ ــ لماذا تعتبر مشكلة الاخراج أقل تعقيدا في شجرة الحور (Maple) عنها في الكلب؟

٦ ــ أذكر أهم التركيبات اللازمة للحفاظ على التوازن المائي في:
(أ) الأميبا (ب) سمك التراوت (Trout)
(ج) الانسان ، (د) الالوديا Elodea ؟

٧ ــ كيف يمكن لكمية من البول المتكونة في الضفدعة أن تتغير عندما تنتقل من مستنقع الى الأرض؟ هل تتغير كمية البول التي يكونها حيوان كلب الماء (Beaver) تحت نفس الظروف؟

٨ ــ ميز بين الاخراج المسمى Excretion والاخراج المسمى Egestion.

٩ ــ تفرز الثدييات آكلة الحوم مركزات أعلى من اليوريا عن الثدييات آكلة الأعشاب، أشرح؟

١٠ ــ أثناء تكون اليوريا، لماذا لا يزيد تركيز الأملاح طردياً مع تركيز اليوريا؟

١١ ــ لا يعاد إمتصاص أو إفراز الانيولين (Inulin) العديد السكريات بواسطة أنابيب الكلية، يصب الانيولين في مجرى الدم في الانسان بمعدل يجعل تركيزه في البلازما ٦ جرام/لتر لمدة ساعة، ويتجمع كل البول المتكون أثناء تلك الفترة وبه ١,٠٢ جرام من الانيولين. كم من الليترات من المرشح النفروني يمكن للفرد ان يكونها خلال ٢٤ ساعة؟ (تعرف القيمة بأنها معدل المرشح النفروني GFR)

١٢ ــ أثناء التجربة التي وصفت في السؤال السابق، تم إفراز ٢٥,٥ جرام من اليوريا في البول. ما هي النسبة المئوية لليوريا المترشحة عند الكبب (glomeruli) والتي يتم إبقاؤها في الأنابيب عندما يكون تركيز اليوريا في البلازما ٣٠٠ ملليجرام /

اللتر طوال المدة (٢٤ ساعة)؟

١٣ ـ خلال نفس الاربع والعشرين ساعة المذكورة في السؤالين السابقين، اعطى الفرد المستحضر (P-aminohippuric acid) بالمعدل الذي يحفظ تركيزه في البلازما له عند المقدار ١٥٠ ملليجرام / لتر، تم إخراج ١٠٠ جرام من المستحضر الدوائي في البول. إشرح الميكانيكية التي أمكن بها إخراج حمض بارا ـ أمينوهيبيوريك (P-Aminohippuric acid).

المراجع REFERENCES

1. SMITH, H. W., The Kidney, Scientific American Offprint No. 37, January, 1953. This beautifully written article reviews the anatomy and physiology of the mammalian kidney, its evolutionary history, and how the various vertebrate kidneys are adapted to the homeostatic needs of their owners.
2. MOFFAT, D. B., The Control of Water Balance by the kidney, Oxford Biology Readers, No. 14, Oxford University Press, Oxford, 1971.
3. FERTIG, D. S. and V. W. EDMONDS, The Physiology of the House Mouse, Scientific American, Offprint No. 1159, October, 1969. With the emphasis on its mechanisms for maintaining water balance.

مطابع المكتب المصرى الحديث
MODERN EGYPTIAN PRESS
ت : ٢٢١١٠٧١ - ٢٢١١٠٧٢ - فاكس ٢٢١١٠٧٣



BIOLOGY

هـذا الكتـــاب

إن التقـدم السريـع الذي يحدث في علوم الأحياء، يجعل هناك المزيد والمزيد دائماً مما نود أن نقوله لأساتذة وطلاب هذا العلم ولكن من عيوب ذلك أن كتب علم الأحياء تزداد كثيراً في الحجم.

لذا نجد أن هذا الكتاب قد تم تجزئته إلى جزئين، الجزء الأول «وهو في كتاب مستقل» يشمل ستة أقسام، وهي مبوبة بدورها إلى خمسة وعشرين باباً. وهذه الأقسام الستة تتلخص في: مقـدمـة، تنظيم الحياة، حياة الخلية، الوراثة، التكاثر والنشأة، تنظيم البيئة الداخلية.

أمّا الجزء الثاني «وهو أيضاً في كتاب مستقل عن الجزء الأول» فقد تم تقسيمه إلى ثلاثة أقسام، وقد تم تبويبها في سبعة عشر بابـاً. وهـذه الأقسـام الثـلاثـة تتحـدث عن: الاحسـاس والتنـاسق، التطور، علم البيئة «الدراسة الاحيائية للعشائر وبيئتهـا». كما أنـه في نهاية الجزء الثاني نجد نبذة عن النظام الدولي للوحدات، وكذلك قائمة المصطلحات مرتبة أبجدياً بالعربية ثم بالانجليزية.